Sulfidjordar och sura sulfatjordar i Västerbotten och Norrbotten

Gustav Sohlenius, Nelly Aroka, Hanna Wåhlén,
Jo Uhlbäck & Lena Persson

juni 2015

SGU-rapport 2015:26

SGU
Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Rättelser
2015-09-09 Byte av tabeller för Mg och Mn på sid. 83.

Omslagsbild: Sticksond med sulfidjord.
Foto: Gustav Sohlenius.

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
fax: 018-17 92 10
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

INNEHÅLL

Sammanfattning ... **4**

Summary ... **5**

Inledning ... **7**

Bakgrund ... **8**
Miljöpåverkan från områden med sura sulfatjordar ... 8
Studier i Norrbotten och Västerbotten ... 10

Metoder för att identifiera områden med sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment ... **12**
De sura sulfatjordarnas och sulfidhaltiga sedimentens karaktär ... 14

Metod ... **15**
Analyser med GIS ... 15
Förberedelser för fältarbetet ... 16

Fältarbete ... **17**
Undersökningsområden ... 17
Provtagning och pH-mätning i fält ... 18
Geofysiska mätningar, resistivitet ... 19

Analyser ... **21**
pH efter oxidation ... 21
Svavel, organiskt kol och några metaller ... 22
Grundämneskoncentrationer ... 22
Klassificering av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment ... 22

Resultat ... **25**
Resultat från GIS-analyser ... 25
De sulfidhaltiga sedimentens och sura sulfatjordarnas kännetecken i fält ... 32
Resultat från pH-mätningar ... 35
Resultat från mätningar i fält ... 36
pH-mätningar efter oxidation ... 40
Svavelanalyser ... 42
Total kolhalt ... 43
Profildata: pH och svavel ... 44
Geokemin hos sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment ... 44
Resistivitetsmätningar ... 52
Sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar i Västernorrlands län ... 54

Diskussion ... **55**
Geografisk fördelning av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment ... 55
Markanvändning och sura sulfatjordar ... 59

Fortsatta arbeten ... **65**

Slutsatser ... **66**

Referenser ... **67**

Tack ... **70**

Bilaga 1. Andelen lera och silt i avrinningsområden ... **71**

Bilaga 2. Resultat från pHmätningar ... **74**

Bilaga 3. Halter av grundämnen och ph ... **80**

Bilaga 4. Kartor över andel lera och silt ... **93**

SAMMANFATTNING

Längs Norrlandskusten påverkas vattnets kvalitet i vissa vattendrag periodvis av sura sulfatjordar. Vattnet kännetecknas då av lågt pH och höga koncentrationer av flera, för miljön skadliga, metaller som aluminium och nickel. Dessa sura jordar bildas då sulfidhaltiga sediment syresätts, vilket oftast sker då grundvattenytan sänks artificiellt, för att exempelvis möjliggöra odling.

För att bättre kunna förutsäga vilka vattendrag som har och kan komma att påverkas negativt av sura sulfatjordar har SGU dokumenterat förekomster av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment i Norrbottens och Västerbottens kustregioner.

Platser i dikad skogs- och jordbruksmark samt i mer opåverkade våtmarker undersöktes för att fastställa i vilken utsträckning sura sulfatjordar bildas som en följd av markanvändning. I syfte att bestämma jordarnas geografiska utbredning studerades lokaler från kusten och inåt land.

Med jordartskartor och annan befintlig geografisk information som stöd valdes lämpliga undersökningsområden ut. De undersökta lokalerna dokumenterades genom att karaktärisera prover tagna från marknivån ner till de reducerade lagren under grundvattennivån. För att avgöra om en jord ska klassificerats som sur sulfatjord har pH mätts i fält. I syfte att avgöra om de reducerade sulfidhaltiga sedimenten är potentiellt försurande mättes pH i laboratorium efter det att proverna under några månader exponerats för luft. Vissa prover analyserades med avseende på svavel, kol, metaller och ett stort antal andra grundämnen.

De sulfidhaltiga sedimenten är ofta, men inte alltid, svartfärgade av järnmonosulfider. Framförallt i Västerbotten påträffades sulfidhaltiga jordar som inte kännetecknades av den svarta färgen. De undersökta sura sulfatjordarna kännetecknas av pH som ofta ligger under 4,0, vertikala sprickor som täcks av rost och ibland även av det gula mineralet jarosit.

Resultaten från denna studie visar att sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment förekommer i områden, vilka enligt SGUs jordartskarta utgörs av lera och silt. Sulfidhaltiga ler- och siltjordar förekommer även i områden där dessa sediment är täckta av yngre avlagringar, som. fl.uviala sediment eller torv, vilka kan förhindra att sura sulfatjordar bildas. Resultaten visar att sura sulfatjordar är vanligt förekommande i områden som under de senaste 5 000 åren torrlagts genom landhöjningen. Det motsvarar en höjd över dagens havsyta på mellan 55 och 60 m. Det gjordes inga observationer av sura sulfatjordar från platser som ligger högre än ca 80 m ö.h., vilket motsvarar områden som torrlades för mer än ca 6 500 år sedan. Eftersom det endast finns ett fåtal undersökta lokaler från dessa nivåer är det dock möjligt att sura sulfatjordar kan förekomma på högre nivåer. Den totala arealen sura sulfatjordar i de två länen uppskattas till minst 600 km^2, men är sannolikt större.

Sura sulfatjordar har främst bildats på platser där grundvattenytan sänkts artificiellt med diken. I våtmarker som är opåverkade av diken exponeras de reducerade sulfidjordarna inte för luft och kan med tiden täckas av tjocka torvlager. Speciellt längs de större älvarna täcker fluviala sediment de sulfidhaltiga sedimenten och förhindrar därmed helt eller delvis att sura sulfatjordar bildas.

De sura förhållandena i sura sulfatjordar leder ofta till att ett flertal metaller (t.ex. nickel, kobolt och kadmium) lakas ut. De transporteras via grund- och porvatten till vattendrag, där de i högre koncentrationer kan ha toxiska effekter på det akvatiska ekosystemet.

Sura sulfatjordar förekommer främst i områden med lera och silt som är yngre än 5 000 år. Därför finns i rapporten kartor som redovisar förekomsten av dessa. Dessutom har andelen lera och silt, yngre än 5 000 år, i huvud- och delavrinningsområdena beräknats, och resultaten redovisas på kartor. Dessa underlag kan användas som ett hjälpmedel för att identifiera vattendrag där vattnet kan vara påverkat av sura sulfatjordar. Förhoppningsvis kan resultaten från denna studie vara ett steg på vägen mot att identifiera områden som kan vara föremål för åtgärder för att minska de negativa miljöeffekter som sura sulfatjordar förorsakar. Alla data som samlats in inom detta projekt finns tillgängliga i SGUs databaser.

SUMMARY

Along the coast of northern Sweden the waters in certain streams are periodically affected by acid sulphate soils, e.g. by low pH and high concentrations of metals such as aluminium and nickel. Acid sulphate soils form when sulfidic reduced sediments are exposed to oxygen, which often happen due to artificial lowering of the groundwater table.

SGU has documented the occurrence of acid sulphate soils and sulphidic sediments in the counties of Västerbotten and Norrbotten, to better understand which streams that may be, or already have been negatively affected by acid sulphate soils.

Land used for agriculture or forestry (commonly drained) were together with unaffected wetlands studied to determine if acid sulphate soils are formed as a consequence of land use. Sites in transects from the coast to successively higher altitudes were studied to further understand the geographical distribution of acid sulphate soils.

Maps of Quaternary deposits and other available geographical information were used to select sampling sites. The studied sites were documented by characterising samples in profiles from the ground surface to levels below the groundwater table. In situ measurements of pH were conducted to identify acid sulphate soils in the field. Laboratory pH measurements were conducted on field samples in order to examine whether some of the reduced sulphidic sediments exhibited potentially acid characteristics when oxidised, thus being potential acid sulphate soils (PAS soils). A number of samples were analysed for sulphur, carbon, metals and other elements.

The colour of sulphidic sediments is often but not always black from iron monosulphides. Especially in Västerbotten sulphidic sediments which lack the characteristic black colour were documented. Acid sulphate soils are often characterised by pH levels <4.0 and vertical soil fissures covered by rust, which sometimes are associated with the yellow mineral jarosite.

Results from this study show that acid sulphate soils and sulphidic sediments occur in areas which according to SGUs maps of Quaternary deposits constitute clay and silt. Sulphidic sediments also occur in areas where these sediments are covered by younger deposits, such as fluvial deposits or peat, which can prevent the formation of acid sulphate soils. The results show that acid sulphate soils mainly occur at sites situated in areas that have been uplifted during the past 5 000 years, as a consequence of the land upheaval, and correspond to altitudes above the present sea level of 55–60 m. There are no observations of acid sulphate soils from altitudes above 80 m a.s.l., which correspond to areas that were uplifted over 6 500 years ago. In this study only a few observations from these higher altitudes were made, thus acid sulphate soils may occur at higher altitudes but are yet to be observed. The total area in which acid sulphate soils in Norrbotten and Västerbotten are abundant, is assumed to be at least 600 km^2, but is probably more extensive.

Acid sulphate soils have mainly formed at sites where the groundwater level has been artificially lowered by ditches. Reduced sulphidic sediments in unaffected wetlands are not exposed to air and will successively be covered by layers of peat, which inhibit the development of acid sulphate soils. Along large rivers layers of fluvial sediments prevent underlying sulphidic sediments from developing into acid sulphate soils.

In acid sulphate soils the low pH conditions commonly causes leaching of certain elements (e.g. nickel, cobalt and cadmium), which when mobilised can enter porewaters and discharge into watercourses, having detrimental effects on the aquatic ecosystem as a consequence.

Since acid sulphate soils are abundant mainly in areas with clay and silt younger than 5 000 years, the occurrences of these deposits are illustrated on maps in this report. The proportion of clay and silt younger than 5 000 years in the drainage areas have also been calculated and are illustrated on maps. The results of this study can be used as an aid to identify streams

that are negatively affected by acid sulphate soils, and will hopefully contribute to the identification of acid sulphate soil hot spots, where measures can be taken to decrease the negative environmental impacts from these acid soils. All data collected within this project are stored in the SGU databases.

INLEDNING

I både Sverige och Finland finns områden med sulfidjord och sur sulfatjord (fig. 1). Sulfidjord är namnet på reducerade sulfidhaltiga ler- och siltjordar. Sura sulfatjordar bildas då den reducerade sulfidjorden syresätts, vilket leder till en kraftig sänkning av pH. I processen kan metaller urlakas och ge toxiska koncentrationer, vilka när de mobiliseras kan påverka den akvatiska miljön negativt i anslutande vattendrag. Studier har visat att vattenkvaliteten i avrinningsområden med en hög andel sura sulfatjordar periodvis påverkas negativt (Åström & Björklund 1995). I Sverige har detta problem främst uppmärksammats längs Norrlandskusten, där sulfidhaltiga sediment genom landhöjningen har nått ovan havsnivån. De negativa miljöpåverkan som uppstår vid syresättning av sulfidjordar utlöses ofta av att grundvattenytan sänkts artificiellt genom dikning, t.ex. i samband med byggnationer eller för att möjliggöra uppodling (Österholm & Åström 2004, Boman m.fl. 2010).

Sulfidjordar och sura sulfatjordar förekommer även i andra delar av världen. I exempelvis Australien och Sydostasien finns stora arealer med sura sulfatjordar (Dent & Pons 1995). I Europa förekommer sura sulfatjordar t.ex. i Nederländerna samt i de delar av Finland och Sverige som varit täckta av bräckt vatten men som genom landhöjningen har torrlagts (t.ex. Edelman 1950, Öborn 1994).

De sulfidhaltiga sedimenten har, efter den senaste istiden, avsatts på Östersjöns botten och sedan genom landhöjningen torrlagts (t.ex. Fromm 1965). I tidigare publikationer har den s.k. marina gränsen ibland angetts som den övre gränsen för förekomster av sulfidhaltiga sediment (Öborn 1994). Den marina gränsen motsvarar den högsta nivå som täckts av bräckt eller marint

Figur 1. **A.** Sulfidjord är ofta helt svart eller svartbandad och kännetecknas av ett neutralt pH. Vid kontakt med luft bleknar dessa jordar snabbt då sulfidmineralen oxiderar varvid pH sjunker. **B.** Sura sulfatjordar bildas vid oxidation av sulfidjord och kan ofta kännas igen med blotta ögat. De karaktäriseras av vertikala torksprickor som täcks av rostlager. Ofta förekommer även det blekgula mineralet jarosit. Jordar med dessa karaktäristika kännetecknas ofta av pH under 4.

vatten efter den senaste istiden. Det Östersjöstadium med bräckt vatten som inleddes när vattnets yta stod vid den marina gränsen i norra Sverige, brukar benämnas Littorinahavet. De sulfidhaltiga sedimenten har till största delen avsatts i bräckt vatten och eftersom den marina gränsen representerar den högsta nivån som täckts av bräckt vatten har denna gräns angetts som en övre nivå för förekomsten av dessa sediment.

Flera studier av sulfidhaltiga jordar längst Bottenviken (Georgala 1980, Sohlenius & Öborn 2004, Boman m.fl. 2008) visar att jordarna innehåller både pyrit (FeS_2) och monosulfider som greigit och mackinavit. En oxidation av dessa mineral leder till att pH sjunker. Formel 1 och 2 visar hur oxidation av pyrit sker i två steg vilket leder till att protoner (H^+) frigörs. Vid reaktionen mellan syre och pyrit bildas svavelsyra (H_2SO_4) och tvåvärt järn (Fe^{2+}). Reaktionen mellan Fe^{2+} och syre kan sedan leda till att ytterligare protoner frigörs. Fe^{2+} kan transporteras med vatten från den sulfidhaltiga jorden och vid oxidation förorsaka försurande förhållanden i exempelvis täckdiken belägna en bit från den sulfidhaltiga jorden.

Formel 1

$$FeS_2 + 7/2\ O_2 + H_2O \rightarrow Fe_2+ + 2SO4^{2-} + 2H^+$$

Formel 2

$$Fe^{2+} + 1/4O_2 + 3/2H_2O \rightarrow FeOOH + 2H^+$$

Sveriges geologiska undersökning (SGU) har tidigare med utgångspunkt i befintlig geologisk information tagit fram riskkartor där områden med sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar kan förekomma (Sohlenius 2011). Under 2012 och 2013 har SGU genom studier i fält och analyser i laboratorium dokumenterat förekomster av sulfidjord och sura sulfatjordar i Västerbottens och Norrbottens län. I denna rapport redovisas resultat från dessa undersökningar. Dessutom rapporteras resultat från en mindre inledande studie som utfördes i Västernorrland under 2011. Resultaten har använts för att utvärdera de riskkartor som tidigare tagits fram av SGU (Sohlenius 2011), för att bättre bedöma var dessa jordar sannolikt förekommer. Dessutom redovisas resultat från ett antal GIS-analyser som utfördes på SGU under 2014 för att bättre ringa in i vilka områden vattendragen kan vara negativt påverkade av sura sulfatjordar.

Inom projektet pågår dessutom ett arbete med att samla in uppgifter från andra aktörer, exempelvis Trafikverket. Dessa data kommer att användas tillsammans med andra, som samlats in inom projektet, för att ta fram en mer detaljerad karta som visar var det är sannolikt att sura och potentiellt sura sulfatjordar förekommer. Alla data kommer att lagras i en databas där observationer av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment redovisas. De produkter som tas fram inom projektet kommer att kunna användas som planeringsunderlag av Länsstyrelsen, Vattenmyndigheterna och kommunerna i Norrlands kustområden. Förhoppningsvis kan denna rapport, samt de produkter som planeras, kunna ligga till grund för åtgärder för att minska negativa miljöeffekter från sura sulfatjordar.

BAKGRUND

Miljöpåverkan från områden med sura sulfatjordar

Ett av målen med EUs vattendirektiv är att skapa god ekologisk och kemisk status i sjöar och vattendrag. Med anledning av detta har frågan om de sura sulfatjordarnas påverkan på vattenmiljön aktualiserats. I Sverige förekommer sura sulfatjordar främst längs Norrlandskusten, men det finns belägg för att de även förekommer längre söderut, exempelvis kring Mälaren (Öborn & Andersson 1999, Öborn 1994, Sohlenius & Öborn 2004). Flera studier från Västerbotten och Norrbotten har visat att många kustnära vattendrag sannolikt är påverkade av sura sulfatjordar

(Filppa 2012, Erixon 2009, Avenius 2013), vilket i vissa fall lett till fiskdöd (Byrsten & Sandberg 2005, Wickström 1939, 1940).

I Finland, framför allt i Österbotten, finns stora arealer med sura sulfatjordar och det finns ett flertal studier som visar att dessa jordar påtagligt påverkar kemin i många vattendrag (Åström & Björklund 1995, Åström 2001). I Finland har man visat att de sammanlagda utsläppen av vissa metaller (aluminium, kadmium, kobolt, mangan, nickel och zink) från områden med sura sulfatjordar är större än hela den finska industrins utsläpp (Sundström m.fl. 2002). Efter flera fall av fiskdöd har de sura sulfatjordarna i Finland fått relativt stor nationell uppmärksamhet. Finlands geologiska undersökning (GTK) inledde därför 2009 en kartering av dessa jordar.

Även om arealen med sura sulfatjordar är mindre i Sverige än i Finland (Öborn 1994) så är det tydligt att dessa jordar även här påverkar miljön i många vattendrag negativt (Öhlander m.fl. 2013, Åström 2007). I Västerbotten har Myrstener (2012) och Avenius (2013) visat att många vattendrag i kustnära områden med hög andel finsediment periodvis kännetecknas av lågt pH samt höga halter av vissa metaller (t.ex kadmium, koppar, zink och aluminium). De höga sulfathalterna i kombination med låga pH-värden indikerar att vattendragen är påverkade av sulfidoxidation. I Västerbotten har denna påverkan speciellt uppmärksammats i vattendrag där det i avrinningsområdena finns sjöar som sänkts för att bereda odlingsmark (Avenius 2013). I Norrbotten har Filppa (2012) visat att kustnära vattendrag med en hög andel finsediment i sina avrinningsområden tidvis kännetecknas av låga pH-värden, som en följd av de sura sulfatjordar som bildats där sulfidhaltiga sediment förekommer. Vattenkemin i Persöfjärden strax norr om Luleå är periodvis påverkad av sulfidoxidation, vilket visats i flera studier (Erixon 2009, Filppa 2012), och här har lågt pH och höga metallkoncentrationer vid minst ett tillfälle sannolikt lett till fiskdöd (Byrsten & Sandberg 2005).

I Finland har man visat att dikning av jordbruksmark, främst etablering av djupa täckdiken, lett till omfattande oxidation av sulfidmineral och därmed påverkan på vattendragens kemi (Boman m.fl. 2008). Beräkningar visar att det tar ungefär trettio år efter en dikning innan belastningen av metaller och svavel (S) till vattendragen har halverats, och att det därtill tar betydligt längre tid innan de negativa ekologiska effekterna försvinner (Österholm & Åström 2004). De vattendrag som påverkas av sura sulfatjordar uppvisar stora vattenkemiska variationer både mellan olika år och inom ett visst år (Erixon 2009). Under torra perioder sjunker grundvattenytan, vilket leder till att sulfidmineralen i de jordlager som då hamnar ovan grundvattnets yta oxiderar. Om en torrperiod efterföljs av en period med stor nederbörd eller snösmältning finns det risk för att stora mängder metaller når vattendrag (Erixon 2009, Toivonen m.fl. 2013, Saarinen & Kløve 2012). Enligt Erixon (2009) är de årliga klimatvariationerna den viktigaste orsaken till de sura sulfatjordarnas påverkan på vattenkemin i vissa vattendrag i Norrbotten. Även om klimatvariationer påverkar processen bör det påpekas, att de relativt djupt liggande sulfidjordar som syresätts under torra år, i de flesta fall skulle vara belägna under grundvattenytan om ingen dikning hade utförts (Boman m.fl. 2010).

Mobilisering av metaller från kustnära områden med sura sulfatjordar längs Norrlandskusten är säkert, liksom i Finland (Sundström m.fl. 2002), en betydande källa för metaller till Östersjön. Detta bekräftas av resultat från Erixon (2009) som visat att den totala metalltransporten från Persöfjärden, norr om Luleå, under ett år kan överstiga, eller vara i nivå med, den från Kalix älv som har ett hundra gånger större vattenflöde.

De sura sulfatjordarna påverkar inte bara vattenkemin. Det har även visat sig att vissa grödor som växer på dessa jordar har relativt höga halter av vissa metaller (Co, Ni, Mn och Al, Fältmarsch m.fl. 2008, Palko 1986). Det finns även studier som visar att komjölken från områden med sura sulfatjordar innehåller relativt mycket aluminium (Alhonen m.fl. 1997). Det är därför tänkbart att sura sulfatjordar även kan påverka människors hälsa (Fältmarsch m.fl. 2008).

Sulfidjordar är känsliga för kompaktion och har dålig hållfasthet. Flera undersökningar har därför gjorts för att bestämma deras geotekniska egenskaper (Westerberg & Andersson 2009, Müller 2010, Andersson 2012, Larsson m.fl. 2007). En bättre kunskap om sulfidjordarnas geografiska fördelning kan komma till nytta vid planering av infrastrukturprojekt där markens geotekniska egenskaper är av vikt. Kunskapen kan också användas för att minska risken för negativ påverkan på grundvatten genom att åtgärdsplaner tas fram för områden där sulfidjordar förekommer.

I Sverige finns idag inga riktlinjer för hur den negativa effekten av sura sulfatjordar skulle kunna minskas genom t.ex. en förändrad markanvändning. Pousette (2007) har utarbetat rekommendationer för hur sulfidhaltiga jordar bör hanteras i samband med byggnationer. I Finland finns däremot en handbok för reglering av grundvattennivåer i syfte att minska oxidation av sulfidhaltiga sediment (Uusi-Kämppä m.fl. 2013). Avsikten är att beskriva metoder som kan användas för att undvika att grundvattenytan i jordbruksmark med sulfidjord sjunker allt för djupt under torrperioder. Genom att hålla grundvattenytan uppe under dessa perioder finns det förutsättningar att minska oxidationen av sulfidmineral.

Studier i Norrbotten och Västerbotten

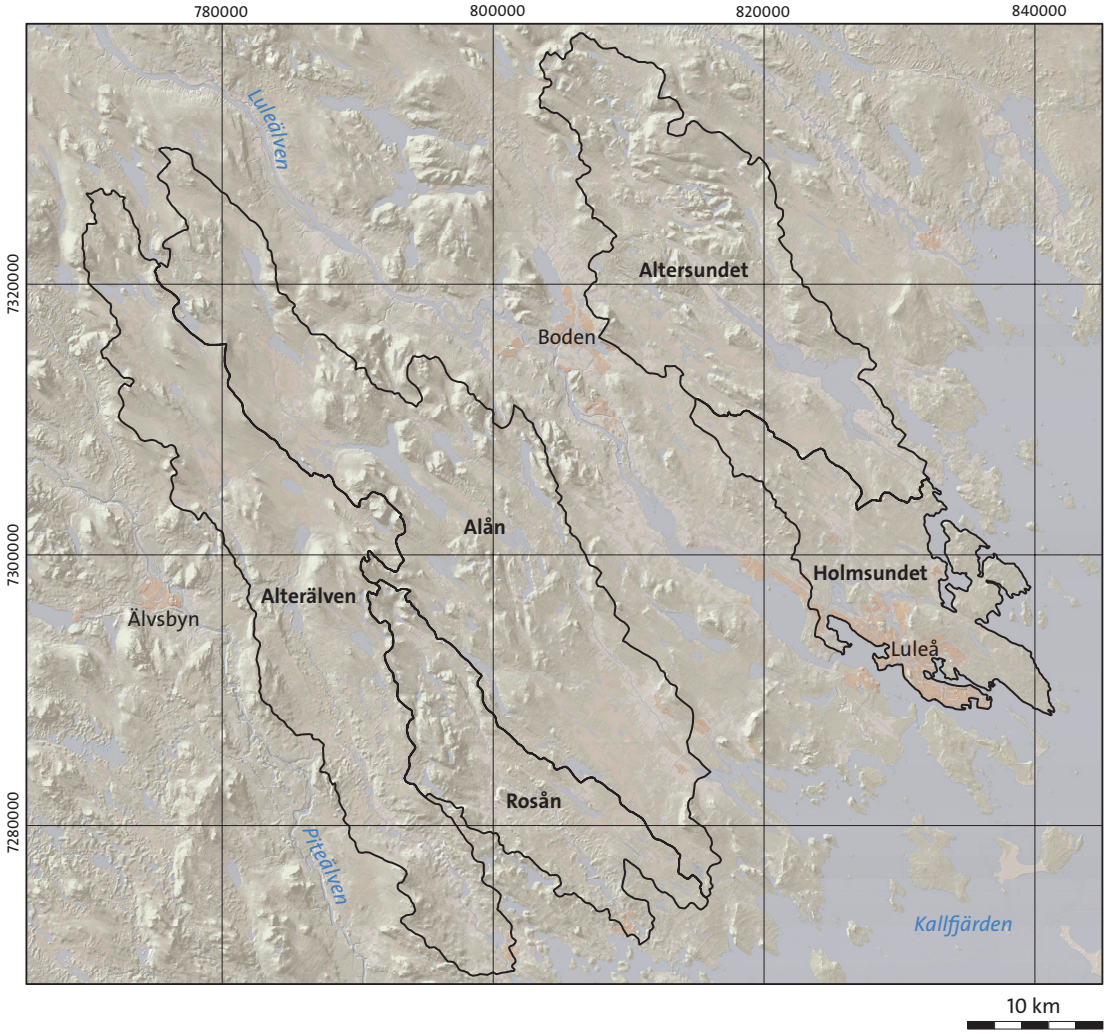
Det är sedan länge känt att sulfidhaltiga sediment förekommer i Västerbotten och Norrbotten, och de miljöproblem som är relaterade till dessa jordar uppmärksammades redan vid SGUs länsvisa jordartskartering (Fromm 1965, Granlund 1943). Stratigrafin och de kemiska egenskaperna för Norrbottens och Västerbottens sulfidhaltiga jordar har beskrivits i flera rapporter och publikationer, t.ex. Fromm (1965), Jerbo (1965) Sohlenius & Öborn (2003), Nystrand (1980), Öborn (1994) och Georgala (1980).

De sulfidhaltiga sedimenten utgörs av lera och silt som avsatts på relativt stora vattendjup eller i skyddade grunda vikar och fjärdar. Enligt de studier som presenterats av Fromm (1965), Georgala (1980) och Nystrand (1980), har de sulfidhaltiga sedimenten i Norrbotten och Västerbotten till stor del avsatts, i Littorinahavet (som inleddes för ca 8 000 år sedan) och under tiden därefter. Dessa sediments egenskaper gör att man kan anta att de i stor utsträckning har avsatts på relativt stora vattendjup (flera tiotals meter). De sulfidhaltiga sediment som beskrivs av Fromm (1965), Nystrand (1980) och Georgala (1980) består delvis av laminerade sediment som med all sannolikhet har avsatts på tidvis syrefria bottnar belägna på relativt stora vattendjup, under den permanenta haloklinen, vilken idag ligger på mellan 40 och 80 m vattendjup.

I norra Sverige har landhöjningen varit betydligt större än i södra Sverige och sediment avsatta på stora vattendjup i bräckt vatten, d.v.s. från inledningen av Littorinahavet och framåt, har därmed kunnat torrläggas. Dessa sediment har ofta avsatts under lång tid över stora bottenarealer vilket förklarar varför sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar är relativt vanliga i norra Sveriges kustområden. Den mer blygsamma landhöjningen i södra Sverige förklarar varför andelen sulfidhaltiga sediment utgör en relativt liten andel av den totala arealen finkorniga sediment, t.ex. runt Mälaren och Hjälmaren, där sulfidhaltiga sediment avsatts i grunda vikar och fjärdar med mer lokal geografisk utbredning (Sohlenius m.fl. 2004).

De flesta observationer av sulfidhaltiga sediment kommer från områden som genom landhöjningen lyfts upp ur havet under de senaste årtusendena, d.v.s. på platser som ligger nära dagens kustlinje (Ivarsson m.fl. 1996). Denna kunskap har SGU tidigare använt för att ta fram preliminära riskkartor som visar var, längs Norrlandskusten dessa jordar kan förekomma (Sohlenius 2011). De kartorna finns även redovisade senare i denna rapport.

Sohlenius & Öborn (2003) och Öborn (1994) har visat att i många områden längst Norrlandskusten, med sulfidhaltiga sediment har sura sulfatjordar bildats. De sura förhållandena leder till att metaller kan frigöras från dessa sura jordar. Detta bekräftas av resultat från Sohlenius & Öborn (2003) som visar att vissa metaller (t.ex. kadmium, kobolt och nickel) har urlakats



Figur 2. Avrinningsområden för Alterälven, Rosån, Alån, Altersundet och Holmsundet som studerades inom det examensarbete som Erika Filppa utförde på Lunds universitet (efter Filppa 2012). Tre av dessa (Rosån, Altersundet och Holmsundet) har tidigare drabbats av perioder med lågt pH och höga halter av vissa metaller, s.k. surstötar. Dessa vattendrag har en hög andel silt och lera i sina avrinningsområden. SGUs kartering av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment hösten 2012 fokuserade i stor utsträckning på dessa avrinningsområden, samt på kustnära platser kring Luleälven.

från sura sulfatjordar i norra Sverige, samt att det finns kvar lättrörliga metaller i de sura sulfatjordarna, som i framtiden kan nå omgivande vattendrag. Dessa lättrörliga metaller förekommer främst i övergångszonen mellan den oxiderade sura sulfatjorden och den reducerade sulfidjorden (Sohlenius och Öborn 2003).

Det finns, som nämnts tidigare, flera belägg för att vissa vattendrag i Västerbottens och Norrbottens kustområden påverkats negativt av sura sulfatjordar. Under våren 2012 skrev Erika Filppa (Geologiska Institutionen Lunds universitet) ett examensarbete där hon studerade fem mindre avrinningsområden i storleksklassen 200–600 km² belägna i Norrbotten: Alån, Rosån, Alterälven, Altersundet samt Holmsundet (fig. 2). Tre av dessa (Rosån, Altersundet och Holmsundet) har tidigare drabbats av perioder med lågt pH och höga halter av vissa metaller, s.k. surstötar (se karttjänsten Vatteninformationssystem Sverige på Länsstyrelsernas webbplats.).

Studien inkluderade analysering av befintlig information med geografiska informationssystem (GIS) och även pH-mätningar i vattendrag strax efter snöavsmältningen. Filppa (2012) kunde med hjälp av de riskkartor som SGU tidigare tagit fram konstatera att sura sulfatjordar sannolikt förekommer i samtliga av dessa avrinningsområden. Enligt dessa riskkartor har Rosåns, Altersundets och Holmsundets avrinningsområden sannolikt den största utbredningen av sura sulfatjordar, vilket kan förklara varför dessa vattendrag så markant påverkas av surstötar.

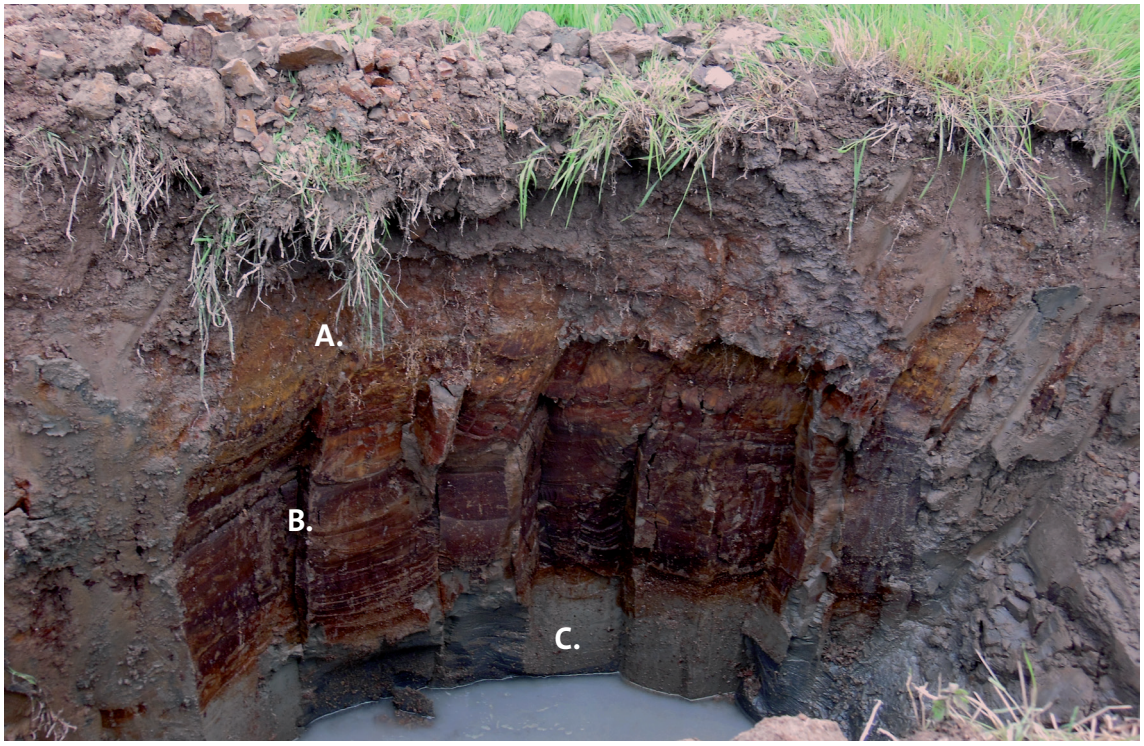
I Västerbotten har, som nämnts ovan, vattenkemin i ett antal kustnära vattendrag undersökts, vilket visat att flera av dem sannolikt är påverkade av sura sulfatjordar (Avenius 2013, Myrstener 2012, Wennman 2000, Sundqvist 2009). Arbeten har utförts inom projektet FLISIK (För Livskraftiga Småvattendrag i Kvarkenregionen). Projektet, som nu är avlutat, ingick i EU-programmet Botnia–Atlantica och syftade till att förbättra livskraften i små vattendrag i Kvarkenregionen. Dessa studier har varit inriktade på vattendrag med stark surhet kopplat till sura sulfatjordar. Resultaten visar bland annat att pH och sulfathalt ofta är låga respektive höga i vattendrag där det finns sänkta sjöar i avrinningsområdet (Avenius 2013). Detta tolkades som en effekt av att sjösänkningarna inneburit en relativt sentida (ofta efter 1950-talet) storskalig och plötslig torrläggning, av tidigare aldrig torrlagda sulfidhaltiga sediment. Det finns även äldre uppgifter om att sjösänkningar i Västerbotten orsakat fiskdöd (Wickström 1939, 1940). Myrstener (2012) visade att vattendragen nära kusten med uppodlade finsediment under vårfloden kännetecknas av en hög elektrisk konduktivitet som orsakas av hög sulfathalt. Den höga sulfathalten tolkades som en effekt av oxiderande sulfidjordar i avrinningsområdena.

METODER FÖR ATT IDENTIFIERA OMRÅDEN MED SURA SULFATJORDAR OCH SULFIDHALTIGA SEDIMENT

SGU har finansierat ett antal forskningsprojekt där det tydligt framgår att vattenkemin i vissa mindre vattendrag har påverkats av sulfidoxidation (Lax 2005, Åström 2007, Öhlander m.fl. 2008, Öhlander m.fl. 2013). SGU har även finansierat undersökningar för att ta reda på om de geologiska data som samlas in av myndigheten, kan användas för att avgöra var sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment förekommer (Sohlenius m.fl. 2004, 2007, Sohlenius 2011, Lax & Sohlenius 2006). Resultaten visar att SGUs data ger en god vägledning om var i landskapet dessa jordar förekommer.

Inom SGUs biogeokemiska kartering har växter från mindre vattendrag analyserats för en rad grundämnen. Eftersom koncentrationerna av de ämnen som förekommer i vattendragen varierar över tiden har vissa växter provtagits, vilka bättre anses spegla vattendragens genomsnittliga kemiska sammansättning. Beroende på vilka växter som förekommer har olika växter använts för analys. I stor utsträckning har vattenmossa (*F. antipyretica*) eller rötter från främst starr (*Carex*) och älggräs (*Filipendula ulmaria*) använts. Resultaten har använts för att ta fram biogeokemiska kartor som ger en bild av de kemiska förhållandena i akvatiska miljöer. Där sura sulfatjordar förekommer är halterna av många metaller höga i de analyserade växterna (exempelvis nickel, kobolt, koppar, och yttrium). Orsaken är att dessa metaller mobiliserats från den sura sulfatjorden som en effekt av ökad kemisk vittring (Lax 2005, Öhlander m.fl. 2008, Öhlander m.fl. 2013).

Biogeokemiska data från förekomster av sura sulfatjordar längs Norrlandskusten uppvisar inte lika påtagligt förhöjda värden som motsvarande områden längre söderut. Detta beror på att de låga pH-värdena i de sura vatten som förekommer i norra Sverige minskar upptaget av metaller i växter (Öhlander m.fl. 2013). I södra Sverige, t.ex. runt Mälaren är dock pH, i vattendrag påverkade av sura sulfatjordar, ofta relativt högt vilket leder till att metaller i större utsträckning tas upp av bäckvattenväxter. Genom att använda kvoterna för nickel/bly (Ni/Pb) och yttrium/bly (Y/Pb) är det dock möjligt att med jordartskartan identifiera ungefär var sura sulfatjordar sannolikt bildats (Lax 2005). De biogeokemiska kartorna baseras på prover som tagits med en



Figur 3. Sur sulfatjord som underlagras av sulfidhaltig jord. Bilder är tagen på jordbruksmark i Djäkneboda, ca 30 km nordöst om Umeå i Västerbotten. **A.** Den övre delen av den sura sulfatjorden har en mer grynig karaktär än underliggande oxiderad jord vilket sannolikt är en följd av frostprocesser. **B.** Den undre delen av den sura sulfatjorden kännetecknas av markanta spricksystem med hög genomsläpplighet för vatten. **C.** Under den rostfärgade sura sulfatjorden syns, strax ovanför grundvattenytan, de svartgrå sulfidhaltiga sedimenten. Notera att den svartgrå färgen snabbt oxideras och blir ljusgrå vid kontakt med luft. Grundvattenytan ligger på denna lokal en dryg meter under markytan. Mätningar av pH i jord provtaget ovan grundvattenytan (A och B i bilden) låg mellan pH 3,3 och 4, medan mätningar vid och under grundvattenytan (C) låg mellan pH 4,4 och 6,2. Efter oxidation hade pH för ett prov taget på 140 cm djup sjunkit från 6,2 till 2,8. Det låga pH-värdet visar att jorden försurats som en följd av att sulfidmineral helt eller delvis oxiderat.

täthet på 1 prov per 6 km². Det innebär att mindre områden med sura sulfatjordar många gånger inte återfinns i dessa data.

I vissa områden finns data från SGUs flyggeofysiska mätningar som kan användas för att avgöra markens resistivitet, d.v.s. markens förmåga att leda elektricitet. Sulfidhaltiga sediment har relativt god ledningsförmåga och framträder ofta som lågresistiva (Sohlenius m.fl. 2007). Resultaten från de flyggeofysiska undersökningarna kan därför användas tillsammans med jordartskartan, för att skilja sulfidhaltiga leror från andra leror som inte är lika lågresistiva. Dessa data ger dock endast en översiktlig bild av var sulfidjordarna förekommer. Dessutom krävs kunskap om övriga geologiska förhållanden så att inga felaktiga tolkningar görs. För att närmare undersöka de sulfidhaltiga sedimentens resistivitet har markgeofysiska metoder testats där sulfidhaltiga sediment förekommer (Sohlenius m.fl. 2007). Studien var inriktad på tre regioner, en i Västerbotten, en i Mälardalen och en i Norrbotten. Resultaten visar att utbredningen av sulfidhaltiga sediment sammanfaller med områden som har låg resistivitet. Resultat från resistivitetsmätningar kan därför användas tillsammans med borrhålsdata för att bedöma de sulfidhaltiga sedimentens mäktighet och geografiska utbredning. Orsaken till de sulfidhaltiga sedimentens låga resistivitet är inte känd, men kan bero på att dessa finkorniga sediment har avsatts

Figur 4. Sur sulfatjord med underliggande sulfidjord från Söderfjärden ca 10 km söder om Vasa i Österbotten, Finland. A) Sur sulfatjord med grynig karaktär och mindre sprickor, B) Sur sulfatjord med stora vertikala sprickor och C) Svartfärgad reducerad sulfidjord. Denna profil uppvisar samma karaktäristika som de jordar i Västerbotten och Norrbotten vilka undersökts inom detta projekt.

i brackvatten, vilket gör att salthalten i porvattnet är hög och ledningsförmågan därmed är god. Även i Finland finns undersökningar som bekräftar att de sulfidhaltiga sedimenten ofta har låg resistivitet (Suppala m.fl. 2005, Lintinen m.fl. 2003).

De sura sulfatjordarnas och sulfidhaltiga sedimentens karaktär

De sura sulfatjordarnas och sulfidhaltiga sedimentens fältkaraktär har beskrivits i flera publikationer (Fromm 1965, Öborn 1994). I norra Sverige innehåller de sulfidhaltiga jordarna en hög andel järnsulfid (FeS) vilket ger de sulfidhaltiga jordarna en distinkt svart färg och de har därför fått benämningen svartmocka. Längre söderut kring Mälaren är de sulfidhaltiga jordarna ofta dominerade av pyrit (FeS_2) och kännetecknas då inte av den svarta färg som är vanlig längre norrut (Sohlenius & Öborn 2004). Den svarta färgen bleknar snabbt i kontakt med luftens syre varvid pH sjunker vid bildning av svavelsyra.

Sura sulfatjordar har dokumenterats både i Sverige och i Finland och kännetecknas av rikligt förekommande sprickor med rostbeläggningar (fig. 3 och 4). Den övre delen av den sura sulfatjorden har en mer grynig karaktär än underliggande oxiderad jord, vilket sannolikt är en följd

Tabell 1. Den nomenklatur som används i denna rapport skiljer sig något från den som används av GTK i Finland (Edén m.fl. 2012). I denna rapport används både begreppen sulfidjord och sulfidhaltiga sediment för att beskriva reducerade sediment som innehåller sulfidmineral.

Denna rapport	Finland (GTK)
Sur sulfatjord	Sur sulfatjord
Övergångszon	Potentiellt sur sulfatjord (PASS)
Sulfidjord (sulfidhaltiga sediment)	Potentiellt sur sulfatjord (PASS)

av frostprocesser. Den undre delen av den sura sulfatjorden kännetecknas av markanta sprickssystem med hög genomsläpplighet för vatten. Ofta förekommer det ljusgula mineralet jarosit ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) i anslutning till rostutfällningarna som är stabilt vid pH 3–4.

Mellan den oxiderade sura sulfatjorden och de reducerade sulfidhaltiga sedimenten finns ofta en övergångszon (*Transition zone*) där oxiderade förhållanden tidvis råder. Denna zon är dock periodvis under grundvattenytan och de rostbeklädda sprickor som är karaktäristiska för de sura sulfatjordarna har därför inte bildats. Eftersom syre ibland tränger ner i övergångszonen har sulfidmineralen delvis oxiderat, vilket lett till att pH är lägre än i den underliggande sulfidjorden. I denna zon är halterna av lättrörliga metaller ofta höga, vilket visats i studier både från Sverige och Finland (Sohlenius & Öborn 2004, Åström 1997).

Den nomenklatur som används i denna rapport för att karaktärisera sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment skiljer sig något åt från den som används av GTK i Finland. I tabell 1 redovisas båda dessa nomenklaturer. Den som används i Finland kan lätt översättas till den som används i denna rapport och vice versa. Termerna sulfidjord och potentiellt sur sulfatjord är dock inte helt ekvivalenta eftersom vissa sulfidjordar kan ha en högt buffrande förmåga vilket motverkar bildningen av sura sulfatjordar vid oxidation.

METOD

De metoder som används i denna studie omfattar både analyser av data som sedan tidigare finns tillgängliga på SGU, och analyser av nya data som samlats in i Västerbotten och Norrbotten under 2012 och 2013. Alla data som samlats in inom detta projekt finns tillgängliga vid SGU. Den information som finns i SGUs databaser kan fås från SGUs kundtjänst. I denna rapport finns dock vissa data som inte tidigare tagits fram vid SGU, och som därmed inte kunnat levereras till befintliga databaser. All information kommer att bli tillgänglig under 2015. I ett senare skede kommer nyinsamlad data att analyseras tillsammans med den information som fanns på SGU sedan tidigare. Den analysen kommer dessutom att innefatta data som samlats in från andra aktörer (främst Trafikverket).

Analyser med GIS

För att bedöma var i Västerbottens och Norrbottens län det är sannolikt att sura sulfatjordar påverkar vattenkvaliteten negativt, har en rad GIS-analyser utförts med befintliga SGU-data. Sulfidjordar är, som nämnts ovan, finkorniga sediment vilka främst förekommer i områden som varit täckta av bräckt vatten och relativt nyligen torrlagts.

Genom att använda SGUs landhöjningsmodell (Påsse & Andersson 2005) har kartor tagits fram som visar när de två länen successivt höjts ur havet. Dessa kartor avser att ge en uppfattning om i vilka områden det är troligt att de finkorniga sedimenten är sulfidhaltiga.

Genom att kombinera jordartskartor med en landhöjningsmodell har SGU tidigare identifierat platser där det finns risk för att sulfidjordar förekommer (Sohlenius 2011). Dessa kartor

redovisas även i denna rapport. Områden med potentiella sulfidjordar har delats in i tre klasser: 1) områden som torrlagts för mer än 4 000 år sedan, 2) områden som torrlagts för mellan 4 000 och 2 000 år sedan och 3) områden som torrlagts för mindre än 2 000 år sedan. Därefter har jordarterna silt och lera inom de tre klasserna identifierats med utgångspunkt från jordartskartan. Jordarterna har sedan delats in i två klasser: 1) områden där sulfidhaltiga sediment eller sura sulfatjordar kan förekomma närmast markytan, 2) områden där de sulfidhaltiga jordarna kan finnas under andra yngre jordarter. Störst sannolikhet för att sulfidjordar förekommer bedöms finnas i områden som torrlagts under de senaste 2000 åren. Kartor som visar var sulfidhaltiga jordar kan förekomma har tagits fram för Västernorrlands, Västerbottens och Norrbottens län. Resultaten har jämförts med en inventering av kända lokaler med sulfidjordar, som utförts av Umeå universitet (Ivarsson m.fl. 1996). De data över observationer av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment som redovisas i denna rapport, har använts för att uppdatera den riskkarta som beskrivs ovan.

Eftersom de flesta observationer av sulfidhaltiga sediment kommer från platser som relativt nyligen stigit ur havet har den areella andelen lera och silt i de olika åldersintervallen beräknats för de två länen. Resultaten av dessa beräkningar redovisas på kartor som visar hur stor andel av varje åldersintervall som utgörs av lera eller silt.

Genom att analysera andelen silt och lera i avrinningsområdena så har den areella andelen av dessa jordarter i avrinningsområdena bestämts. Detta har gjorts på både länens huvudavrinningsområden och delavrinningsområden. Dessutom har andelen jordbruksmark belägen där det enligt jordartskartan finns lera och silt beräknats. Detta eftersom sura sulfatjordar ofta bildas där grundvattenytan sänkts artificiellt för att möjliggöra uppodling.

Förberedelser för fältarbetet

Som tidigare nämnts kartlägger Finlands geologiska undersökning (GTK) sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar i Finland (Edén 2012a, 2012b, Österholm m.fl. 2010). SGU har använt en likartad metodik för att dokumentera motsvarande jordar i Sverige.

Inför fältarbetet samlades data ihop från utvalda områden i Norrbotten och Västerbotten. Intressanta data var bland annat jordartskartor (SGU jordarter 1:50 000–1:100 000 databas, 2013), riskkartor för sulfidjord som tidigare tagits fram av SGU (Sohlenius 2011) och SGUs biogeokemiska data (SGU, Biogeokemi – databas, 2013). Med hjälp av biogeokemiska data kunde områden med förhöjda värden av toxiska metaller, som är typiska för platser med sur sulfatjord, pekas ut.

Externa data som insamlades var rapporter och artiklar från myndigheter och universitet angående observationer av sulfidjordar längs Norrlandskusten. Lantmäteriet stod som källa för fastighetskartor samt höjdmodell över Sverige. Lantmäteriets nationella höjdmodell användes för att uppdaga graden av dikespåverkan. Information om dikespåverkan var av intresse, då avsänkning av grundvattenytan ofta leder till att sura sulfatjordar bildas. För att ha ovanstående data tillgängliga vid fältarbetet laddades det in i en fältdator med programmet ArcMap 10.1 som användes för presentation och bearbetning av framtagen geografisk data.

Både i Norrbotten och i Västerbotten inriktades fältarbeten på de områden där det finns indikationer på, att vattendragens kemi påverkats negativt av förekomsten av sura sulfatjordar (Filppa 2012, Avenius 2013). Detta för att belägga sambandet mellan påverkan på vattenkemin och förekomsten av sura sulfatjordar. Ett annat syfte var att identifiera förekomster av sulfidhaltiga sediment, vilka potentiellt kan utvecklas till sura sulfatjordar. För att hitta sådana platser valdes lokaler ut där grundvattenytan inte sänkts med diken.

Figur 5. Vid undersökningarna togs prover från platser med olika markanvändning. Detta gjordes för att studera hur olika markanvändning i områden med sulfidjordar påverkar förekomsten av sura sulfatjordar. I första hand kan sänkt grundvattenyta genom dikning förväntas leda till att sura sulfatjordar bildas. **A.** Åkermark med diken. Denna typ av markanvändning kan leda till att sulfidjordar syresätts och bildar sura sulfatjordar. **B.** Före detta åkermark som har övergivits och nu är bevuxen med björk. Denna marktyp är relativt vanlig i den undersökta regionen. De diken som grävdes då områdena använts som åkermark, finns fortfarande kvar, vilket gör att grundvattenytan fortfarande står relativt lågt. **C.** Våtmark där grundvattenytan står högt och effekterna av sulfidoxidation kan förväntas vara begränsade. **D.** Dikad skogsmark där grundvattenytan sänkts för ökad skogstillväxt.

FÄLTARBETE

Undersökningsområden

Under fältarbetet undersöktes potentiella förekomster av sulfidjord, med utgångspunkt från de data som samlades ihop då fältarbetet förbereddes. Ler- och siltjordar med olika markanvändning och belägna på varierande höjd över havet undersöktes. Dessutom besöktes lokaler där de sulfidhaltiga ler- och siltjordarna överlagrades av andra jordarter som torv eller sand. När torv överlagrade de minerogena sedimenten angavs torvdjupet. Överlagrande jordarter som var sandiga (exempelvis älvsediment och svämsediment) var det däremot svårare att bestämma tjockleken på, eftersom de inte alltid skiljer sig på ett distinkt sätt från underliggande silt och lera. På många platser påträffades flera lager med sand i profilerna, varierade i kornstorlek från finsand till grovsand.

Förutom en regelrätt kartering av sulfidjordar och sura sulfatjordar undersöktes huruvida markanvändningen påverkar förutsättningarna för att sura sulfatjordar ska bildas. Intressanta marktyper var dikad och odikad skogs- och våtmark samt åkermark i produktion och åkermark i träda (fig. 5).

En viktig fråga att besvara var att ta reda på hur väl riskkartor som SGU tidigare tagit fram (Sohlenius 2011) stämmer överens med de verkliga förhållandena.

Figur 6. **A.** Två provtagare användes för att ta jordprover: Edelmanborr 120 cm lång (nedtill) och sticksond 110 cm lång (upptill). Djupare liggande lager togs med en förlängningsbar Edelmannborr och sticksond. **B.** Mätning i fält med diverse övriga verktyg som spade, pH-mätare, måttstock och kniv.

Provtagning och pH-mätning i fält

I fält beskrevs undersökningslokaler i bild och skrift och koordinater togs med GPS. Därefter borrades ett mindre hål i marken med en sticksond eller Edelmanborr (fig. 6), och jordprover från olika nivåer i markprofilen togs upp och undersöktes. Både sticksonden och borren fanns i en förlängningsbar version för att möjliggöra åtkomst av djupliggande lager. Det visade sig dock att de provmängder som erhölls med sonden inte alltid var tillräckliga för senare analyser av jorden. Provtagningen utfördes därför mestadels med Edelmanborren.

Jordprover togs successivt från markytan och nedåt, där jordlagren ovanför grundvattenytan ofta utgjordes av oxiderad sur sulfatjord, medan jordlagren under grundvattenytan på många platser utgjordes av en mörkt färgad reducerad sulfidjord. Utmärkande egenskaper för sur sulfatjord, som förekomsten av rostutfällningar, jarosit och sprickbildningar, noterades. För sulfidjord dokumenterades den säregna mörka färgen som ibland förekom i stråk eller band. Det bör noteras att grundvattenytan inte alltid nåddes vid undersökningslokalerna, men i fall där grundvattenytans läge fastställdes kunde övergången mellan sur sulfatjord och sulfidjord lättare identifieras därefter. I vissa fall provtogs den djupare liggande sulfidjorden från botten av ett dike, medan de övre jordlagren provtogs från en plats nära diket.

Förutom karaktär och stratigrafi dokumenterades även jordarnas pH i fält. Till detta användes en Hamilton 340i pH- och en konduktivitetsfickmätare (*pH and Conductivity Pocket Meter*) med två typer av elektroder: *flatrode* och *doublepore* (fig. 7). Vid fältarbete i Norrbotten noterades att den spetsiga doublepore-elektroden lätt går sönder vid mätningar på ler- och siltjordar. Vid fältarbete i Västerbotten ersattes därför doublepore-elektroden med elektroden flatrode (med platt yta) som visade sig överlägsen vid mätningar på finkorniga jordar.

För att bedöma hur olika markanvändning och dikning påverkar platser med sulfidhaltiga sediment, angavs nivån under markytan där reducerade sulfidhaltiga sediment påträffades, som en indikation på hur mäktiga lager av sur sulfatjord som bildats. Denna nivå kan ofta observeras i fält eftersom färgen på sedimenten beror på hur oxiderade sulfiderna i sedimenten är. I denna studie bedömdes att reducerade sulfidhaltiga sediment har ett pH över 6 i fält, förutsatt att sedimenten uppfyllde övriga kriterier som krävs för att klassificeras som sulfidhaltiga (se nedan). Ofta överlagrades sulfidjorden av sur sulfatjord, men ibland återfanns sulfidjord direkt under en yngre jordart, exempelvis direkt under ett lager med torv eller älvsediment. I dessa fall noterades mäktigheten hos dessa överlagrande jordarter.

Figur 7. pH mätaren Hamilton 340i pH- och konduktivitetsfickmätare med tillhörande elektroder (double-pore t.v. och flatrode t.h.).

Ett antal jordprover sparades i plastpåsar för senare analys i laboratorium. En stor del av dessa prov var tagna från nivåer under grundvattenytan, och kännetecknades av neutralt pH i fält. Dessa prover kunde alltså misstänkas vara sulfidhaltiga. I labb testades om jordarnas pH sjönk då de utsattes för syre. En kraftig pH-sänkning vid oxidation indikerar att proverna innehållit sulfidmineral. För att ytterligare belägga förekomsten av sulfidmineral analyserades vissa prover med avseende på svavel.

Vissa prover med lågt pH i fält, som betecknades som sur sulfatjord, användes för att testa om pH sjönk ytterligare vid oxidering. På några platser togs prover med relativt täta djupintervall som senare analyserades med avseende på en rad geokemiska parametrar (se avsnittet Resultat).

Sammanlagt togs 238 prov från 168 borrpunkter i Norrbotten 2012, och 186 prover från 157 borrpunkter i Västerbotten 2013.

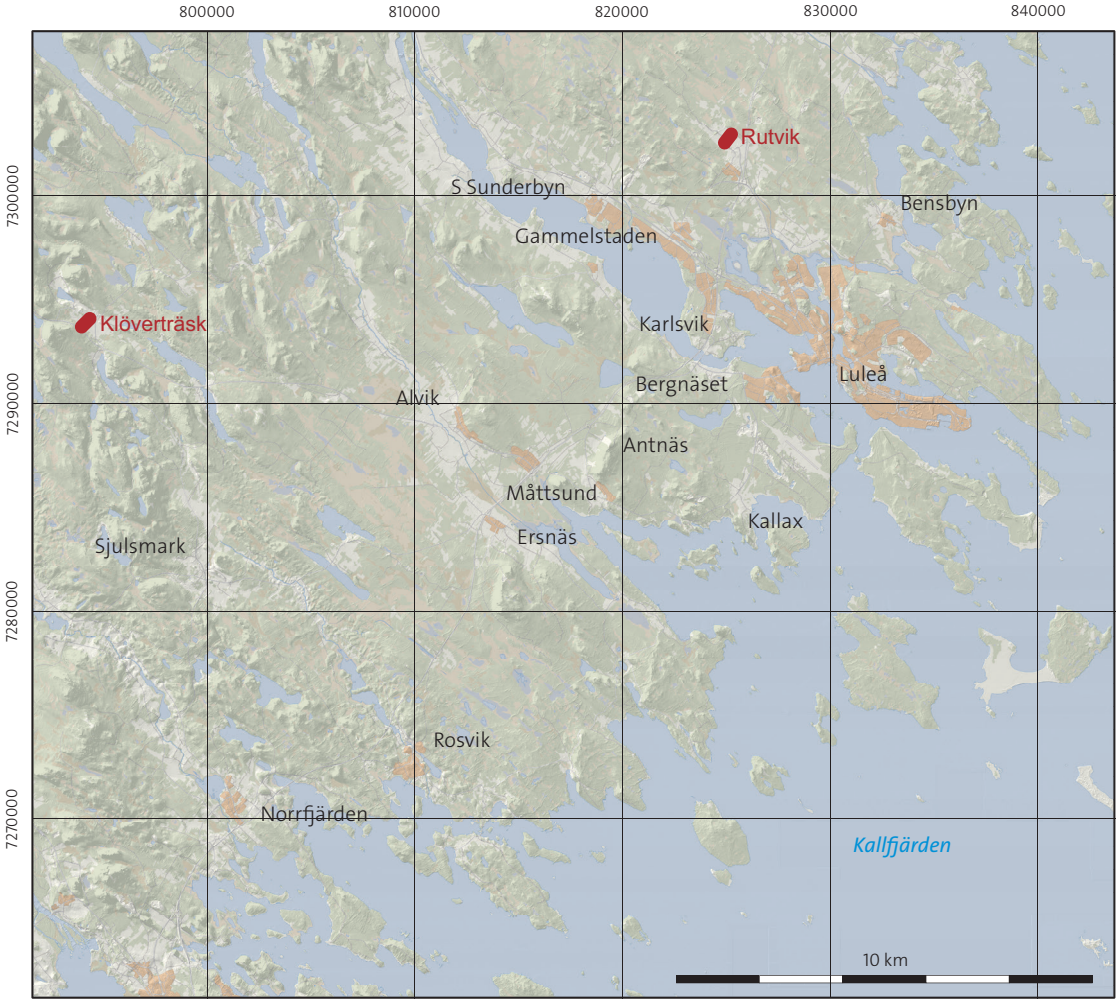
Geofysiska mätningar, resistivitet

Fältarbetet i Norrbotten omfattade resistivitetsmätningar på två platser. Inga resistivitetsmätningar utfördes i Västerbotten, där sådana mätningar skett inom ett tidigare FoU-projekt (Sohlenius m.fl. 2007).

Vid elektrisk resistivitetsmätning utsänds en ström i marken, via två strömelektroder. Potentialskillnaden registreras med två potentialelektroder och markens resistivitet kan sedan beräknas. Genom att öka avståndet mellan strömelektroderna erhålls en större djupkänning, och variationer av markens resistivitet i djupled kan bestämmas.

Finkorniga sediment som lera och silt uppvisar generellt mycket låg resistivitet, till skillnad mot friktionsjordar som sand, grus och morän. Lera har vanligtvis resistiviteter under 50 Wm (d.v.s. en lägre resistivitet än hos de flesta andra jordarter) och är därför lätta att identifiera vid en mätning. Resistiviteten kan dock variera mellan olika platser och är även beroende av andra faktorer som till exempel vattenhalt, porositet och porvätskans sammansättning. Tidigare undersökningar i Norrbotten, Västerbotten och Mälardalen har visat att sulfidhaltiga sediment har lägre resistivitet i jämförelse med andra finkorninga sediment, troligtvis beroende på en högre kloridhalt i de sulfidhaltiga sedimenten (Sohlenius m.fl. 2007).

De två lokaler som valdes för resistivitetsmätningar i Norrbotten låg på ler- och siltjordar på olika höjd över havet. Den ena lokalen, Rutvik, är belägen nära kusten på cirka 4 m ö.h., och den andra lokalen är Klöverträsk längre in i landet på 60 m ö.h. (fig. 8).



Figur 8. Resistivitetsmätningar utfördes på lokalerna Rutvik och Klöverträsk. Båda platserna ligger på jordbruksmark och anges som silt-lera i SGUs jordarts-databas (1989 och 1992).

Vid mätningarna användes ett multielektrod-system från ABEM Instrument AB där ett stort antal elektroder placerades ut med 2 m avstånd längs en 280 m lång mätlinje (fig. 9). Kontinuerlig information erhölls om markens resistivitet, ned till ett maximalt djup av ca 30 m. Resultatet tolkades med inversionsprogrammet Res2Dinv (Loke 2004), där de olika jordlagrens utsträckning och mäktighet kunde identifieras.

Syftet med mätningarna var att undersöka jordlagren och jämföra tolkningen med resultat från manuell borrning och pH-mätning. Det var även intressant att utreda om det fanns eventuella skillnader mellan lokalerna. Lokalen Rutvik ligger nära kusten i ett område där det enligt SGUs tidigare bedömningar finns stor sannolikhet att sulfidhaltiga sediment förekommer (Sohlenius 2011). Lokalen Klöverträsk ligger däremot i ett område där förekomsten av sulfidhaltiga sediment enligt samma bedömning är mindre trolig.

ANALYSER

pH efter oxidation

Prover som kan förväntas innehålla sulfidmineral oxiderades. En kraftig sänkning av pH indikerar att proverna innehållit sulfidmineral som, då de oxiderar ger upphov till ett lägre pH. Syftet med dessa mätningar var att bedöma om det förekommer potentiellt sura sulfatjordar på de

Figur 9. **A.** Mätning av markens resistivitet i Rutvik. **B.** Mätning av markens resistivitet i Klöverträsk. Vid mätningarna placerades elektroder längst en 280 m lång linje.

undersökta platserna. På grund av den stora mängden prover kunde inte alla prov mätas i labb vid ett och samma tillfälle. pH-mätningar i labb skedde således i etapper till dess att alla prov hade en mätning från fält och en i labb efter oxidation. För några prov hade pH inte sjunkit tillräckligt för att med klarhet bestämma om jorden var en sur sulfatjord eller inte. I sådana fall oxiderades proverna ytterligare och en ny pH-mätning gjordes vid ett senare tillfälle.

För prover från Norrbotten påbörjades pH-mätningen i labb efter en månad sedan proverna tagits från fält. För Västerbotten påbörjades pH-mätningen två månader efter fältperioden. Då pH sjunker hastigt vid oxidation kunde pH-ändringar ses redan efter en månad. För prover från Norrbotten gjordes tätare mätningar, under längre tid än för prover från Västerbotten. I fallet med Norrbotten önskades tätare mätserier för att gradvis följa pH-förändringar.

Prov från Norrbotten och Västerbotten oxiderades och pH mättes i labb under fem respektive tre månader. För 32 prov från Västerbotten gick det inte att bestämma om dessa bestod av sur sulfatjord eller inte efter tre månaders oxidation. För dessa prov förlängdes oxidationsperioden ytterligare tre månader varpå nya pH-mätningar genomfördes. Resultatet efter dessa mätningar var att pH för samtliga prov sjönk. 15 prov hade en minskning på mindre än pH 0,5 medan 17 prov hade en minskning på mer än pH 0,5. Efter denna period hade pH för 20 av 32 prov sjunkit under pH 4 och kunde bestämmas som sur sulfatjord.

Mellan mätningarna förvarades proverna i ett kylrum (8 °C). Vissa prover torkade ut under mätperioderna vilket försvårade pH-mätningen, då elektroderna behöver fukt för att fungera optimalt. I sådana fall återfuktades proverna med några droppar destillerat vatten. Därefter utfördes mätningarna efter någon timme, för att minimera effekten från det tillförda vattnets neutrala pH.

Resultaten från pH-mätningarna jämfördes med resultaten från svavelanalyser (se nedan) för att bedöma de undersökta jordarnas sulfidhalter.

Svavel, organiskt kol och några metaller

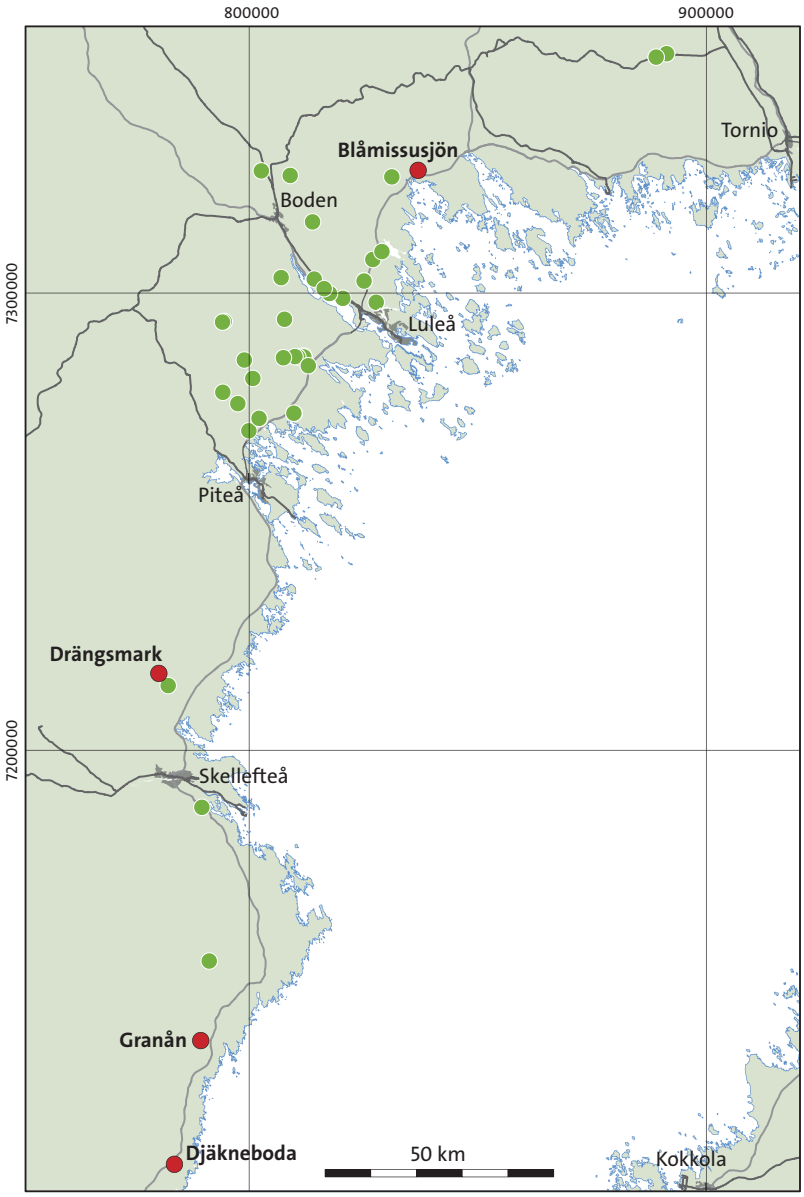
Sammanlagt 100 prov analyserades på Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) med avseende på svavel (S), totalt organiskt kol (TOC) och vissa andra grundämnen (kol, kväve, koppar, järn och mangan). Dessa analyser utfördes på Växtnäringslaboratoriet på Institutionen för mark och miljö vid SLU i Uppsala. Före analys torkades proverna (105 °C) och finfördelades därefter med en mortel. Vad gäller kväve, koppar, järn och mangan redovisas inte resultaten i denna rapport, men finns tillgängliga på SGU. Totalhalterna av kol och kväve analyserades genom att mäta koncentrationen i de gaser som uppstår vid förbränning av prover vid 1 250 °C (Instrument CN 2000 från LECO). Analyser av svavel (S), koppar (Cu), järn (Fe) och mangan (Mn) utfördes med ICP-OES (induktivt kopplad plasma och optisk emissionsspectrometri) efter uppslutning med salpetersyra (7M HNO_3). Halten kol, som främst emanerar från organiskt material, analyserades för att bättre karaktärisera jordarna samt jämföra innehållet av organiskt material och förekomst av sulfidmineral. Sedimentproven analyserades även för metallhalter (koppar, järn och mangan) och jämfördes för icke-oxiderade sulfidjordar och oxiderade sulfatjordar, med syfte att bestämma graden av mobilitet hos metaller som en effekt av sänkt pH.

Grundämneskoncentrationer

Med syfte att undersöka mobiliteten hos vissa grundämnen i sura och potentiellt sura sulfatjordar analyserades utvalda sedimentprov med induktivt kopplad plasma masspektrometri (ICP-MS) på SGUs kemiska laboratorium. Provtagningsplatserna kan ses i figur 10. Sammanlagt 119 prov analyserades för 52 grundämnen: natrium (Na), magnesium (Mg), aluminium (Al), fosfor (P), kalium (K), kalcium (Ca), titan (Ti), vanadin (V), krom (Cr), mangan (Mn), järn (Fe), rubiudium (Rb), strontium (Sr), yttrium (Y), barium (Ba), lantan (La), cerium (Ce), uran (U), samt litium (Li), beryllium (Be), bor (B), skandium (Sc), kobolt (Co), nickel (Ni), koppar (Cu), zink (Zn), germanium (Ge), arsenik (As), selen (Se), zirkonium (Zr), niob (Nb), molybden (Mo), silver (Ag), kadmium (Cd), tenn (Sn), praseodym (Pr), neodym (Nd), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), tulium (Tm), ytterbium (Yb), lutetium (Lu), tungsten (W), tallium (Tl), bly (Pb), vismut (Bi), torium (Th) med ICP-MS (för statistik se bilaga 3). Varje prov bestod utav 2 g uppvägt material av fraktionen <63 µm, och lakades med salpetersyra-uppslutning (15 ml tillsatt utspädd salpetersyra, 7M HNO_3, i 50 minuter på värmeplatta). Metoden är inte en totalhaltsanalys, men visar däremot mobiliteten hos respektive grundämne för varje prov. Koncentrationerna bestäms främst av faktorer som den kemiska mineralsammansättningen hos sedimentet och kornstorleken, men påverkas också till stor del av den oxidation som sker i sura sulfatjordar. Vid oxidation och sänkt pH urlakas metaller från sedimenten och transporteras bort med vatten (nederbörd och grundvatten) via de torksprickor som uppstår.

Klassificering av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment

Sura och potentiellt sura sulfatjordar klassificerades i princip enligt samma system som Finlands geologiska undersökning (GTK) använder, vid kartering av motsvarande jordar (Edén m.fl. 2012). I Finland används termen potentiellt sura sulfatjordar (*Potential acid sulfate soils*, PASS) istället för benämningarna sulfidjordar och sulfidhaltiga sediment som använd i denna rapport (tabell 1). Termerna är dock inte helt likvärdiga eftersom alla sulfidhaltiga sediment inte nödvändigtvis är potentiellt sura, då de i vissa fall har en högt buffrande förmåga, t.ex. om de innehåller kalk (Lax & Sohlenius 2006). Dessutom visar resultaten från denna undersökning (se avsnittet Resultat) att det finns reducerade jordar, som inte innehåller signifikanta halter sulfidmineral men ändå är potentiellt sura. I texten nedan och i tabell 2 beskrivs hur klassificeringen gjorts. För vissa lokaler finns även kompletterande information i SGUs databaser.



Figur 10. De provtagna lokalerna i Västerbotten och Norrbotten är markerade med punkter. I Norrbotten provtogs fler lokaler än i Västerbotten, men relativt få prover analyserades från varje plats. I Västerbotten provtogs endast sex lokaler men ett större antal prover analyserades från varje plats. I denna rapport redovisas resultat från de fyra namngivna platserna (röda punkter).

Tabell 2. Klassificering av de undersökta platserna med utgångspunkt från de pH-värden som uppmättes i fält och i laboratorium. Prov från olika djup bedömdes tillhöra ett lager med oxiderad sulfidjord (OZ), en övergångszon kring grundvattenytan (TZ) eller ett djupare lager med reducerade sulfidhaltiga sediment (RZ). De två sista zonerna motsvarar de potentiellt sura sulfatjordar (PASS) som Finlands geologiska undersökning (GTK) använder vid kartering av motsvarande jordar.

Zon	Klassificeringsgrunder
Sur sulfatjord (OZ)	Prov med pH<4 i fält Alt. prov med pH<4,5 i fält om: – sulfidjord förekommer djupare i profilen – prov från sediment i samma profil sjunkit till pH<4 efter oxidation – sulfidjord förekommer på närliggande lokal (max 100 m därifrån, ex. i ett dike) – sur sulfatjord förekommer på lokalen
Övergångszon (TZ)	Prov med pH mellan 4,5 och pH<6 i fält och pH ≤4 efter oxidation Alt. pH<4,5 efter oxidation och sulfidjord förekommer på lokalen Alt. pH sjönk minst 0,5 pH-enheter till pH≤4 efter oxidation
Sulfidjord (RZ)	Prov med pH≥6 i fält som efter oxidation har pH≤4

Jordarna klassades som sulfidjordar om de före oxidation hade pH ≤6,0 och efter oxidation pH ≤4,0 (tabell 2). Ett fåtal lokaler klassades som troligen sulfidjord då de enligt fältobservationer var sulfidfärgade, dvs. karakteristiskt mörka i färgen, med ett pH på ≥6,0, och ett närliggande prov visar pH ≤4,0 efter syresättning. Med närliggande avser ett oxiderat prov från samma profil, alternativt att en intilliggande lokal, max 100 m därifrån, har sulfidhaltiga sediment i profilen. Med intilliggande lokaler avses till exempel kompletterande prov från ett dike invid en åkermark eller när flera provtagningsplatser valts ut inom samma åkermark, och där endast några prov togs för analyser av pH. Även lokaler där pH sjönk kraftigt, till pH ≤ 4 efter oxidation, men pH i fält saknades, klassades som trolig sulfidjord om fältanteckningar angav att provet varit reducerat i fält. Liksom ett fåtal lokaler där prov saknades men fältanteckningar indikerade att svart eller bandad sulfidjord påträffats. Enligt den finska metodiken klassificeras vissa jordar även utifrån svavelhalt i de översta 40 cm av den sulfidhaltiga lagret. Med en svavelhalt på minst 0,2 % bedöms jorden vara en PASS, enligt Edén m.fl. 2012. I denna undersökning har det högsta svavelvärdet från varje lokal använts vid klassningen (tabell 3), dvs. var svavelhalten minst 0,2 % i något prov så klassades jorden som sulfidhaltig. Med utgångspunkt från svavelhalt har prover med högre svavelhalt än 0,2 % delats in i ytterligare fyra klasser (tabell 3).

Lokalerna som undersöktes klassificerades utifrån det lägsta pH-värdet som uppmättes på sediment i fält (tabell 2 och tabell 4). Platser där den lägsta pH-observationen i fält var <4,0 klassificerades direkt som sura sulfatjordar (klass A och B i tabell 4). Platser med pH 4,0–4,5 (klass C i tabell 4) klassificerades som sura sulfatjordar om de underlagrades av sulfidhaltiga sediment enligt klassificeringen ovan. Dessutom klassades ett fåtal lokaler som sura sulfatjordar när pH i fält var 4,0–4,5 och ett prov från profilen sjönk till pH <4,0 efter oxidation eller, alternativt, sulfidhaltiga sediment konstaterades förekomma på intilliggande lokaler max hundra meter därifrån. Lokaler där pH i fält var 4,5 eller högre klassificerades som inte sur sulfatjord. På ett fåtal platser saknades pH-mätningar från fält, och dessa lokaler har då klassats utifrån fältanteckningar och pH-mätningar efter oxidation och bedömts vara sannolikt sura sulfatjordar, alternativt antagligen inte sura sulfatjordar. I tabell 4 redovisas även jordarnas försurande effekt.

Tabell 3. Maximal procentuell svavelhalt. Total svavelhalt har uppmätts på prov från ett urval av lokalerna. En potentiellt sur sulfatjord där sulfiderna inte har oxiderats fullständigt har en svavelhalt på minst 0,2 % enligt Edén m.fl. 2012. Det högsta värdet från varje lokal har använts vid klassningen. I Finland används samma klasser men klassificeringen utgår från medelvärdet av svavelmätningar från översta 40 cm av den sulfidhaltiga horisonten (Edén m.fl. 2012).

Svavelhalt (%)	Klass
≥1,00	I
0,60–0,99	II
0,20–0,59	III
<0,2	IV

Tabell 4. Klassificering av de undersökta platserna med utgångspunkt från de lägsta pH-värdena som uppmättes i fält. Platser som tillhör klasserna A och B kan direkt klassificeras som sura sulfatjordar. Klass C klassificeras som sur sulfatjord om den underlagras av sulfidhaltiga sediment. Klassificeringen överensstämmer med den finska klassningen av lägsta pH-värde i fält (Edén m.fl. 2012), förutom ett tillägg av kategori E för att markera de lokaler där sannolikheten är mycket låg att få en försurande effekt orsakad av oxiderande sulfidmineral. I tabellen redovisas även jordarnas försurande effekt enligt en bedömning upprättad av GTK.

Det lägsta pH-värdet som uppmättes i fält	Klass
<3,5	A
3,5–3,9	B
4–4,4	C
4,5–4,9	D
≥5,0	E

Det är dock viktigt att komma ihåg att eventuell påverkan på omgivande vatten är beroende av hur stora arealer sura jordar som förekommer i ett visst avrinningsområde.

På lokaler där sulfidjord och sur sulfatjord förekommer klassades det mellanliggande lagret som potentiellt sur sulfatjord när pH i fält låg mellan 4,5–6,0 (tabell 1). På ett fåtal lokaler låg pH i fält mellan just 4,5–6,0 och efter oxidation sjönk pH till <4,0. Dessa lokaler klassades också som sulfidhaltiga sediment, eller troligen sulfidjord, eftersom sulfidjord troligen förekommer djupare i profilen.

På de lokaler där förekomst av sulfidhaltiga sediment inte kunde bekräftas enligt metoden ovan gjordes bedömningar utifrån fältanteckningar och mätningar efter oxidation, och lokalerna indelades i kategorierna troligen, antagligen inte, respektive nej. Ett fåtal lokaler kunde inte klassificeras. På SGU finns information med kommentarer till varje lokal där en platsspecifik bedömning har gjorts. Den informationen kan erhållas genom någon av författarna till denna rapport. De inkluderar även vid vilket djup sulfidhaltiga sedimenten påträffades samt om dessa överlagrades av andra jordarter, t.ex. torv.

RESULTAT

Resultaten från denna undersökning ger en generell bild av hur sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment är geografiskt fördelade i Västerbotten och Norrbottens kustområden. Även om undersökningarna endast omfattar en liten andel av de platser där dessa jordar förekommer, så har resultaten använts för att identifiera andra områden där det är sannolikt att dessa jordar förekommer. De data som tagits fram inom projektet finns tillgängliga på SGU och kan erhållas genom att kontakta SGUs kundtjänst. Viss data har dock inte kunnat levereras till befintliga databaser men kan erhållas genom kontakt med någon av författarna till denna rapport. SGUs databaser kommer dock att uppdateras och inom ett eller två år kommer all data att lagras i godkända databaser.

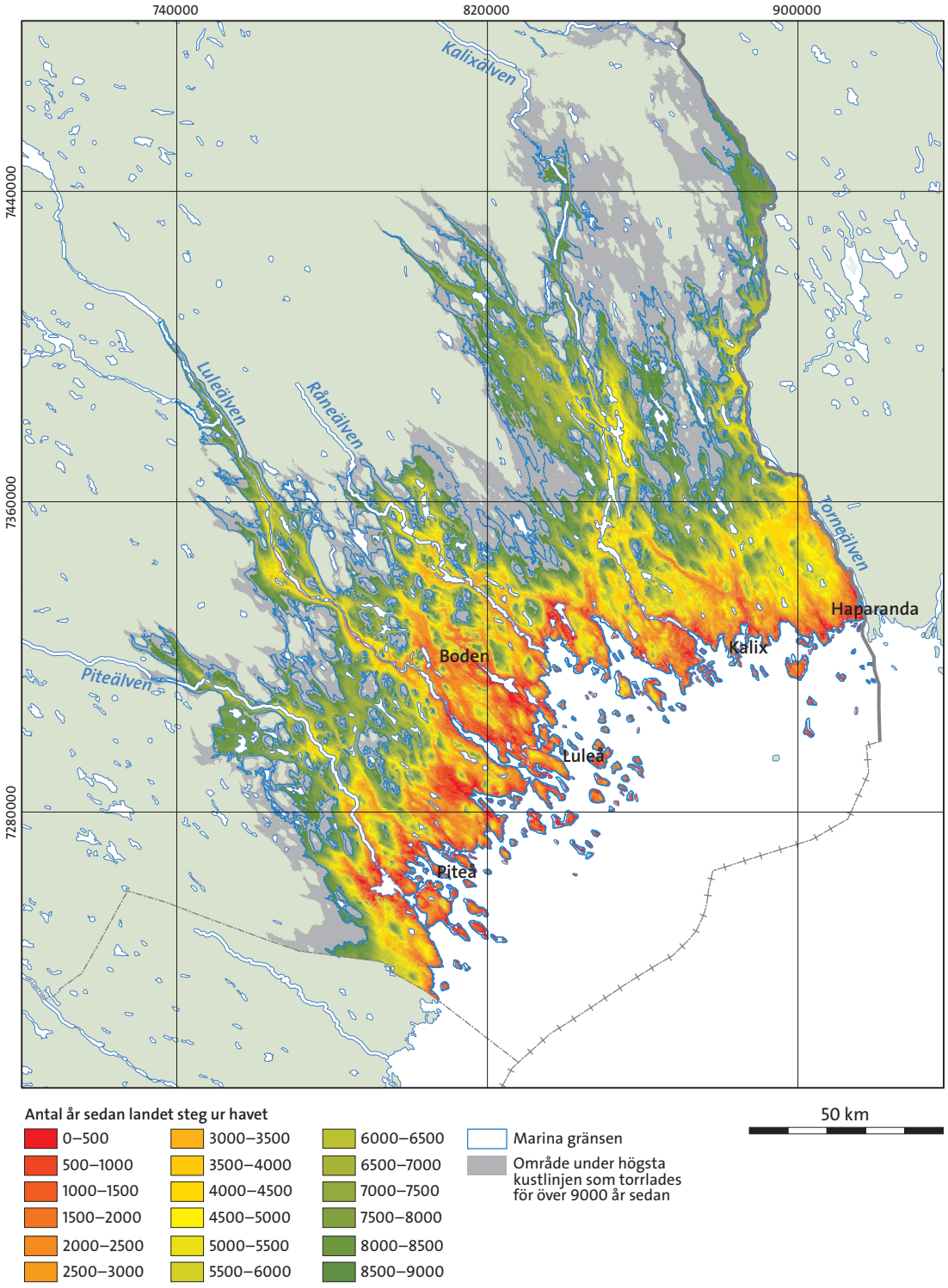
Resultat från GIS-analyser

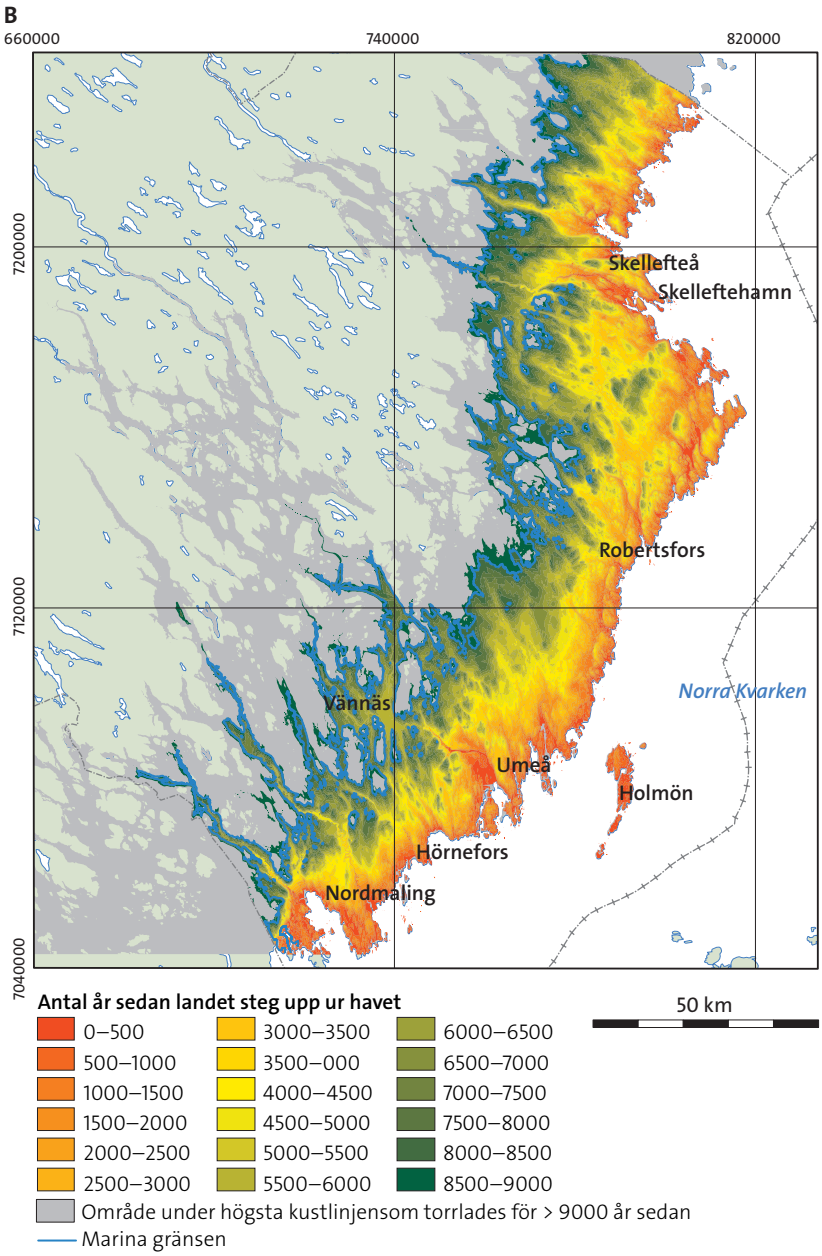
Flera GIS-analyser har gjorts för att bättre ringa in var det är troligt att sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar påverkar vattenmiljön negativt.

Sulfidhaltiga sediment har främst påträffats under den marina gränsen och i figur 11 redovisas hur de två länen successivt höjts ur havet sedan denna gräns bildades för omkring 9 000 år sedan. De två länens kustregioner är relativt flacka vilket gör att det finns relativt stora områden som nyligen, genom den alltjämt pågående landhöjningen torrlagts (fig. 11). I dessa relativt unga regioner finns flera stora områden med silt och lera, där grundvattenytan i stor utsträckning sänkts för att möjliggöra uppodling. I vissa fall utgörs dessa områden av före detta sjöar som sänkts för att erhålla jordbruksmark. Det finns även finsediment som inte används som jordbruksmark, men där grundvatten ändå sänkts artificiellt. Där sulfidhaltig silt och lera förekommer och där grundvattenytan sänkts är det sannolikt att sura sulfatjordar har bildats. I vissa områden täcks de sulfidhaltiga sedimenten av torv eller andra yngre jordarter, vilket gör det mindre troligt att sura sulfatjordar har bildats. De riskkartor som SGU tidigare tagit fram visar lera och silt i tre åldersintervall (fig. 12). Sannolikheten för förekomster av sulfidhaltiga sediment bedömdes som störst i de områden som är 2 000 år eller yngre.

Figur 13 visar andelen lera och silt i Västerbottens och Norrbottens kustregioner som en effekt av landhöjningen under de senaste 9 000 åren (d.v.s. områden under den marina gränsen). Kartorna visar andelen lera och silt som torrlagts under varje 500-årsintervall (fig. 13), alltså hela det område som exempelvis höjdes ur havet för mellan 0 och 500 år sedan, kommer att få en specifik andel lera och silt. I områden yngre än 9 000 år täcks 11,5 % och drygt 15 % av Norrbotten respektive Västerbotten av lera och silt. Det är tydligt att det finns en generell skillnad

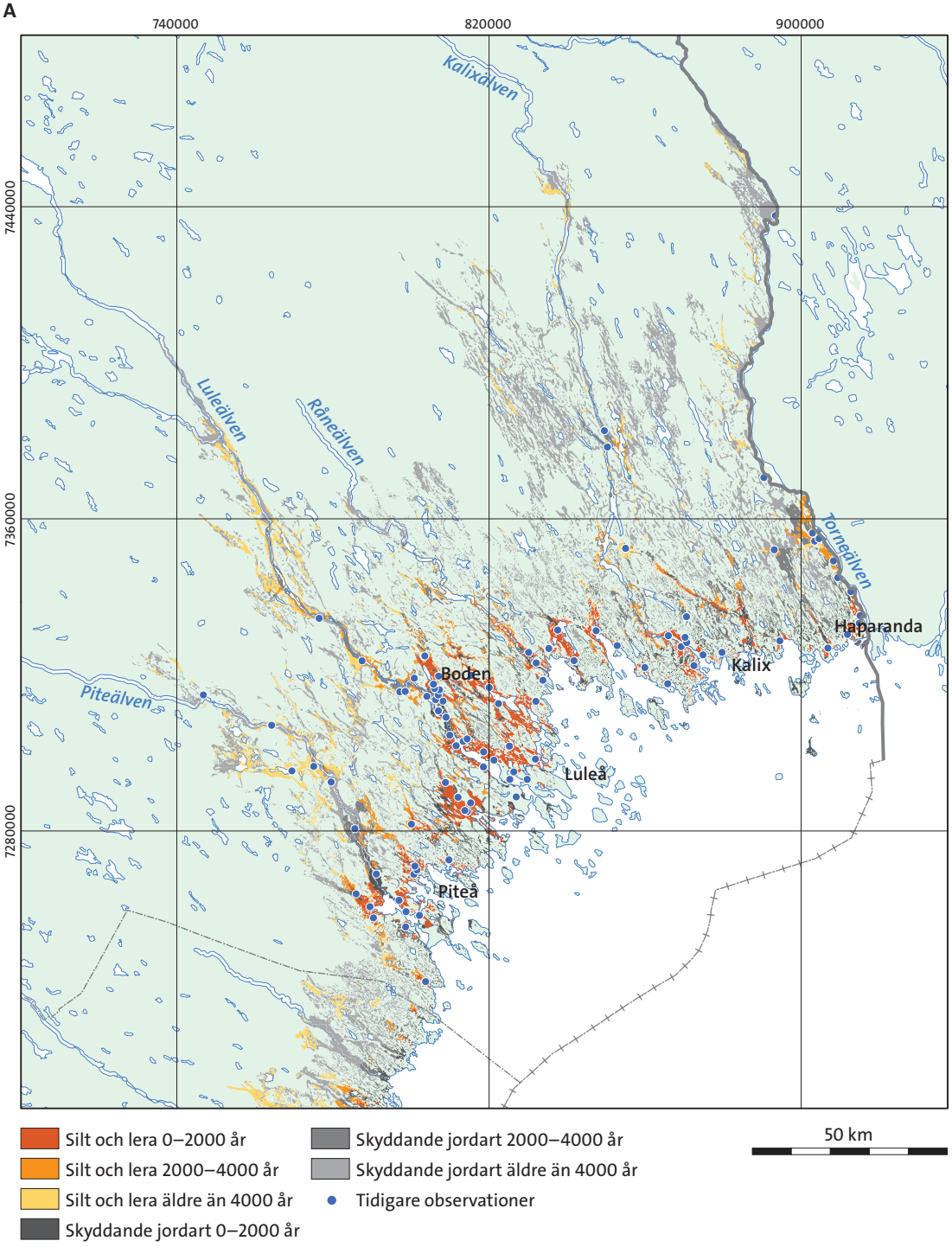
A

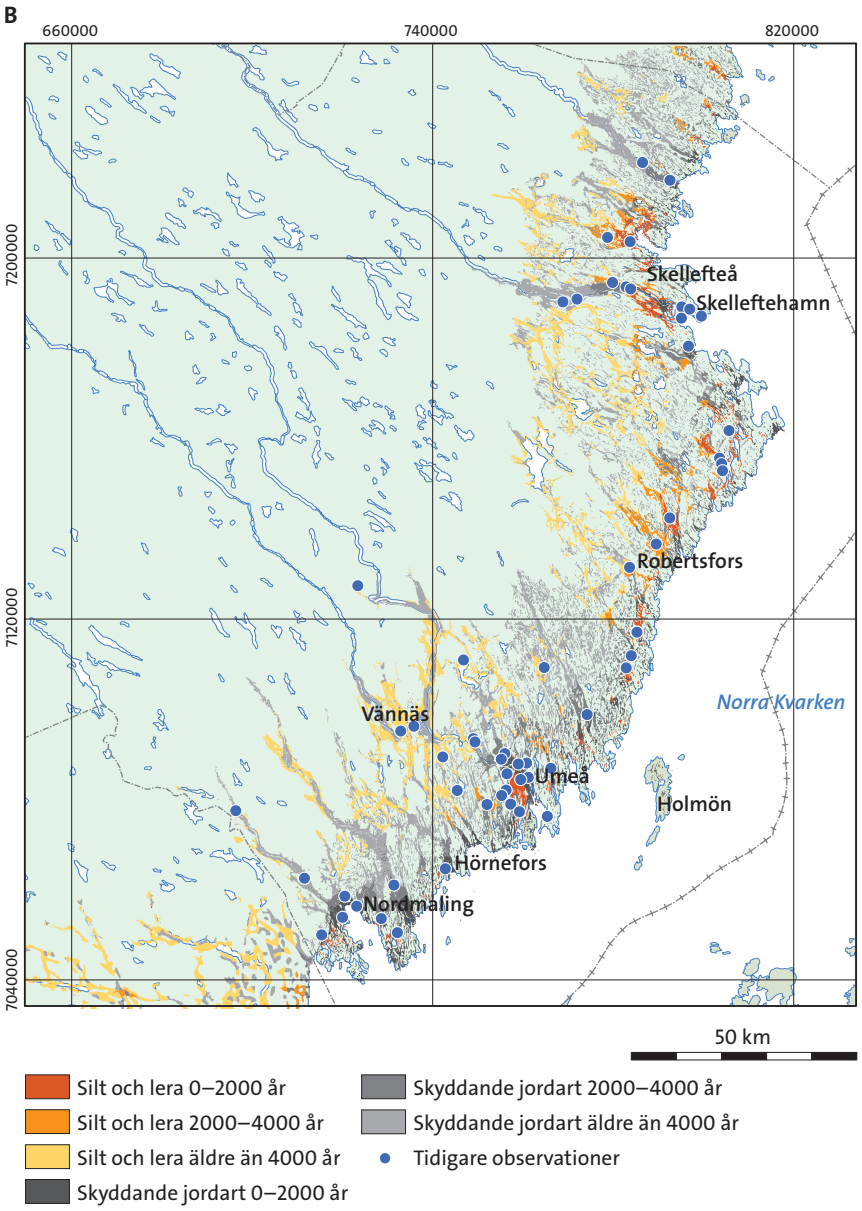

740000
820000
900000
7440000
7360000
7280000
Kalixälven
Luleälven
Råneälven
Torneälven
Piteälven
Haparanda
Kalix
Boden
Luleå
Piteå
Antal år sedan landet steg ur havet
0–500
500–1000
1000–1500
1500–2000
2000–2500
2500–3000
3000–3500
3500–4000
4000–4500
4500–5000
5000–5500
5500–6000
6000–6500
6500–7000
7000–7500
7500–8000
8000–8500
8500–9000
Marina gränsen
Område under högsta kustlinjen som torrlades för över 9000 år sedan
50 km



Figur 11. Landhöjningen under de senaste 9 000 åren i **A.** Norrbotten och **B.** Västerbotten. Kartorna visar hur lång tid som förflutit sedan de kustnära delarna av Västerbotten och Norrbotten steg ur havet. Marina gränsen motsvara den högsta nivån som täckts av bräckt vatten efter den senaste istiden. De sulfidhaltiga sedimenten har till största delen avsatts i bräckt vatten och kan följaktligen förväntas förekomma under den marina gränsen. Områden som ligger ovanför den marina gränsen och den högsta nivån Östersjön nått efter den senaste istiden (högsta kustlinjen) är symboliserade med grått på kartorna. Många tidigare observationer av sulfidjordar kommer från de platser som under de senaste årtusendena nått över havsytenivån (fig. 12).

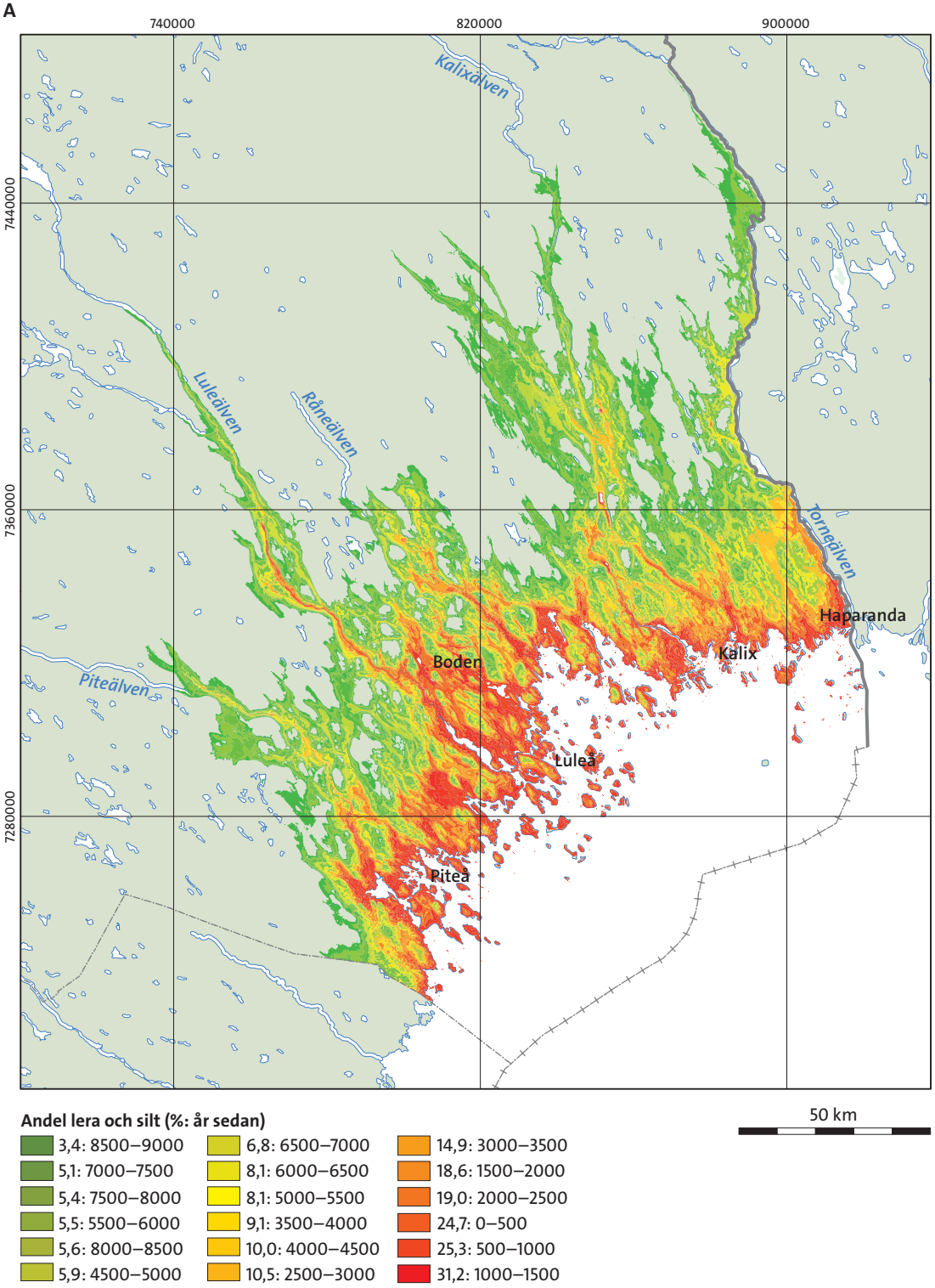
A

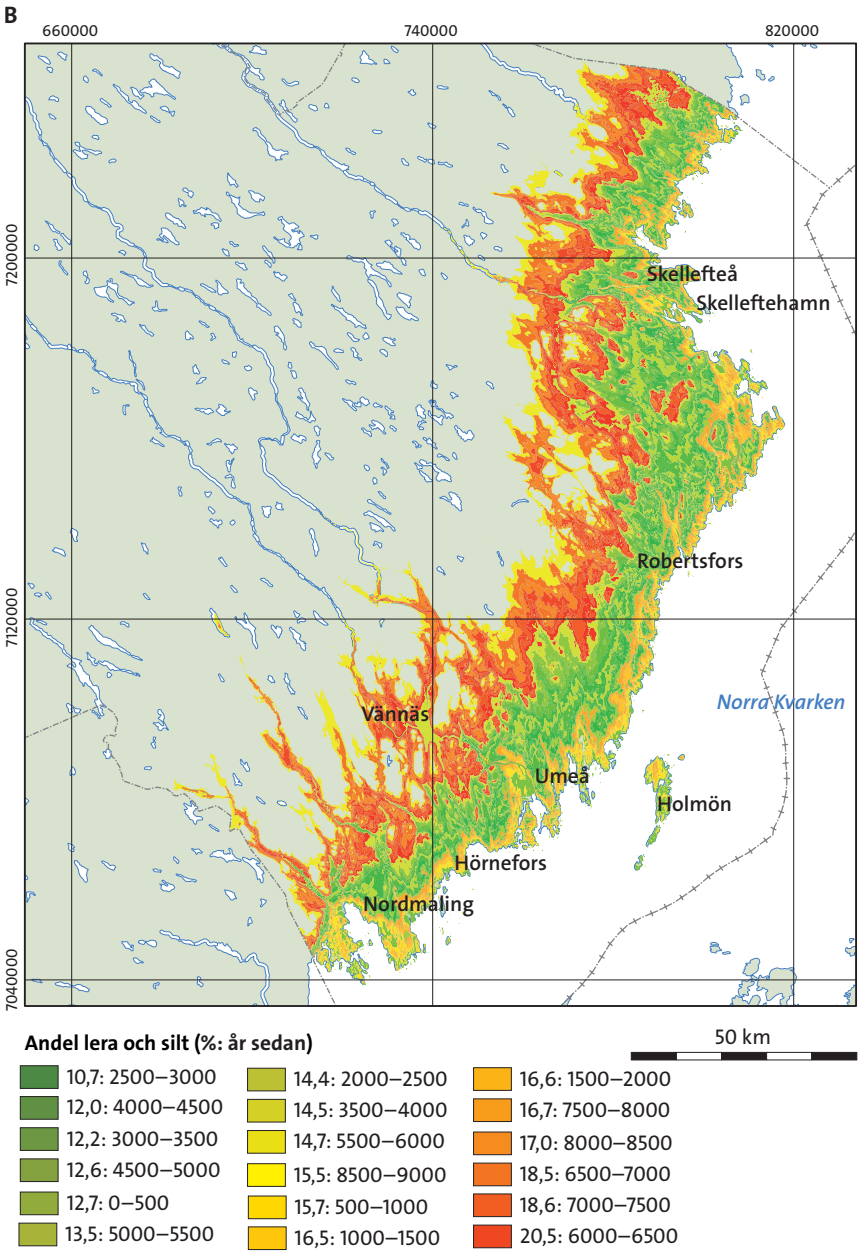

740000
820000
900000
7440000
7360000
7280000
Kalixälven
Luleälven
Råneälven
Torneälven
Piteälven
Haparanda
Kalix
Boden
Luleå
Piteå
Silt och lera 0–2000 år
Silt och lera 2000–4000 år
Silt och lera äldre än 4000 år
Skyddande jordart 0–2000 år
Skyddande jordart 2000–4000 år
Skyddande jordart äldre än 4000 år
Tidigare observationer
50 km



Figur 12. Kartor som visar var i **A.** Norrbotten och **B.** Västerbotten som SGU tidigare bedömt att sannolikheten för att sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar förekommer, är som störst (Sohlenius 2011). De flesta tidigare observationer kommer från kustnära platser, vilka relativt nyligen genom landhöjningen stigit ur havet. Indelningen i riskområden har gjorts med utgångspunkt från SGUs jordartskarta och landhöjningsmodell (Påsse & Andersson 2005). Enligt denna bedömning är sannolikheten för att sulfidhaltiga sediment ska förekomma som störst på platser där det enligt jordartskartan finns silt eller lera, som genom landhöjningen torrlagts under de senaste 2 000 åren. I dessa områden är det också troligt att sura sulfatjordar bildats. I de fall silt och lera täcks av andra jordarter t.ex. torv (skyddande jordart) är det dock mindre sannolikt att sura sulfatjordar ska bildas. De mörkblå punkterna visar läget för lokaler där det sedan tidigare (Ivarsson m.fl. 1996) är känt att sulfidhaltiga sediment förekommer.

A


740000
820000
900000
7440000
7360000
7280000
Kalixälven
Luleälven
Råneälven
Torneälven
Piteälven
Haparanda
Kalix
Boden
Luleå
Piteå
50 km
Andel lera och silt (%: år sedan)
3,4: 8500–9000
5,1: 7000–7500
5,4: 7500–8000
5,5: 5500–6000
5,6: 8000–8500
5,9: 4500–5000
6,8: 6500–7000
8,1: 6000–6500
8,1: 5000–5500
9,1: 3500–4000
10,0: 4000–4500
10,5: 2500–3000
14,9: 3000–3500
18,6: 1500–2000
19,0: 2000–2500
24,7: 0–500
25,3: 500–1000
31,2: 1000–1500



Figur 13. Andelen lera och silt i **A.** Norrbotten och **B.** Västerbottens kustregioner. Analysen har dels utförts med data från SGUs jordartskarta och dels med information som visar hur lång tid som förflutit sedan de olika landarealerna under de senaste 9 000 åren genom landhöjningen stigit ur havet (fig. 11). Varje procenttal visar andelen lera och silt i ett område som stigit ur havet under ett visst 500-årsintervall (exempelvis för mellan 0 och 500 år sedan). Det är tydligt att det finns en generell skillnad mellan Norrbotten och Västerbotten då det gäller fördelningen av lera och silt i kustregionerna. I Norrbotten är andelen lera och silt störst närmast kusten medan den största andelen av dessa jordar i Västerbotten förekommer 10–20 km från kusten.

mellan Norrbotten och Västerbotten när det gäller fördelningen av lera och silt i kustområdena (fig. 13). I Norrbotten är andelen lera och silt störst närmast kusten i de delar som senast, genom landhöjningen, höjts över havsytenivån. Andelen av dessa jordarter minskar sedan successivt som en funktion av områdenas ålder. I Västerbotten förekommer den största andelen av dessa jordar däremot längre in från kusten, i regioner som torrlagts för mer än 6 000 år sedan. Delar av de mest kustnära delarna av Västerbotten domineras istället av morän. I Norrbotten är den relativa skillnaden stor då de gäller andelen lera och silt. Här utgörs 25–30 % av arealen närmast kusten av dessa jordarter, medan endast drygt 3 % av områden som varit torrlagda under längst tid täcks av lera och silt. I Västerbotten varierar andelen lera och silt mellan 10 och 20 %. Figur 13 ger dock en generaliserad bild, och i båda de undersökta länen förekommer områden som avviker från den bilden. I Västerbotten finns exempelvis stora arealer silt och lera i kustområdena kring Umeå och Skellefteå.

Andelen lera och silt i huvud- och delavrinningsområdena i Västerbotten och Norrbotten redovisas i figur 14 och i bilaga 1. I båda länen finns stora älvar vars avrinningsområden stäcker sig ända upp till fjällkedjan. Även om dessa älvar har stora arealer sura sulfatjordar i sina avrinningsområden så utgör dessa endast en mindre andel av det totala avrinningsområdet. I båda länen finns dock några mindre, kustnära huvudavrinningsområden med en betydligt större andel lera och silt. Då det gäller delavrinningsområdena ser bilden lite annorlunda ut, och vissa av de mindre vattendrag som anknyter till de stora älvarna har en relativt stor andel lera och silt, som till stor del utgörs av jordbruksmark. Sura sulfatjordar kan i första hand förväntas bildas där grundvattenytan sänkts artificiellt genom dikning, exempelvis på jordbruksmark (Öborn 1994, Boman m.fl.. 2010). Figur 14 och bilaga 1 visar därför även andelen av avrinningsområdena där den ytligast liggande jordarten enligt SGUs jordartskarta utgörs av lera och silt och som dessutom utgörs av jordbruksmark (enligt Jordbruksverkets blockdata). Det är intressant att notera att de tre avrinningsområden där vattendragen enligt Filppa (2012) är påverkade av sura sulfatjordar, har bland Norrbottens högsta andel lera och silt (fig. 14).

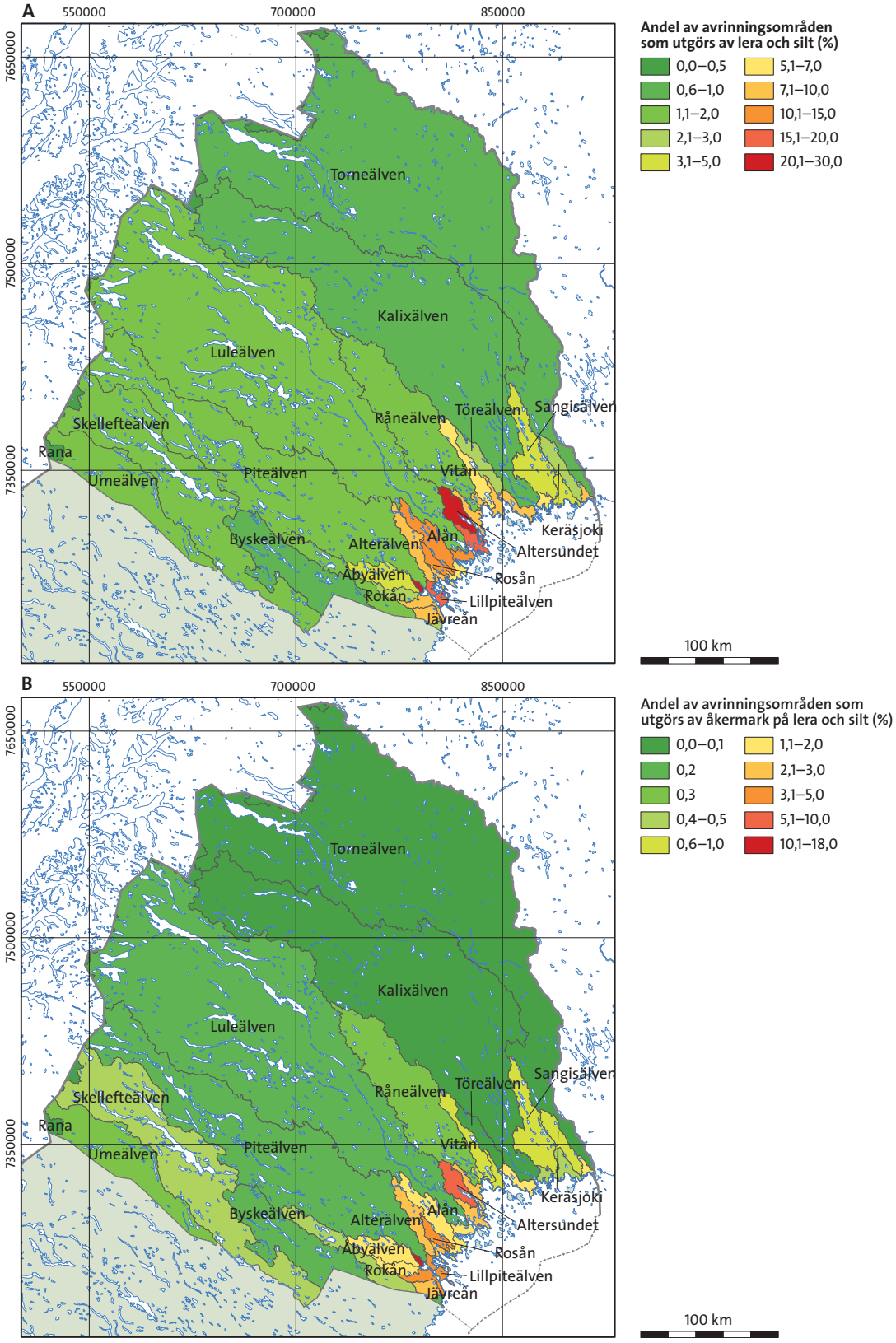
Utifrån de kartor som redovisas ovan kan man dra slutsatsen, att de negativa miljöproblem som förorsakas av sura sulfatjordar generellt sett bör vara större i Norrbotten än i Västerbotten. Detta eftersom andelen lera och silt är stor i Norrbottens kustområden.

De sulfidhaltiga sedimentens och sura sulfatjordarnas kännetecken i fält

Under fältarbetet blev det tydligt att en stor andel av åkermarken närmast kusten i både Västerbotten och Norrbotten utgörs av sura sulfatjordar, vilka underlagras av svartfärgade sulfidjordar med pH mellan 6 och 7. Vid fältbesöken framgick att det förekommer rikligt med diken i uppodlade områden med sura sulfatjordar. Det indikerar att grundvattenytan sänkts artificiellt vilket gynnat utvecklingen av sulfidjord till sur sulfatjord.

Sura sulfatjordar påträffades även i ung björkskog som sannolikt utgjordes av före detta åkermark. Dessa sura jordar har sannolikt bildats då områdena var uppodlade men har behållit sin karaktär eftersom omgivande diken fortfarande håller grundvattenytan nere. I våtmarker har den höga grundvattennivån många gånger lett till att sura sulfatjordar inte bildats. Här har istället ett torvlager ofta ackumulerat ovanpå de sulfidhaltiga sedimenten.

De sulfidhaltiga sedimenten kännetecknas ofta, men inte alltid, av en distinkt svart färg som orsakas av järn(mono)sulfider (fig. 15) som greigit och mackinavit (Boman m.fl. 2008). Vid vissa lokaler påträffades svartbandade eller mörkgrå sediment (fig. 15), vilka var sulfidhaltiga. Avsaknad av den karaktäristiska svarta färgen kan därför inte ses som ett belägg för att ett finkornigt sediment inte är sulfidhaltigt. Speciellt i Västerbotten påträffades på flera platser mörkt gråa sediment (fig. 15) som visade sig innehålla en betydande procentandel svavel. Vid kemisk analys på 36 mörkt gråa prov från Västerbotten konstaterades att svavelhalten i 23 prov översteg



Figur 14. Andelen lera silt i Norrbottens huvudavrinningsområden. **A.** Total andel lera och silt i avrinningsområdet. **B.** Andelen av avrinningsområdena som utgörs av åkermark, belägna där jordarterna utgörs av lera och silt. Det är tydligt att det är de mindre, kustnära avrinningsområdena som har den största totala och uppodlade andelen lera och silt. De stora älvarna, vars avrinningsområden sträcker sig upp mot fjällkedjan, har en liten total andel lera och silt även om dessa jordarter är vanligt förekommande i de kustnära delarna av älvarnas avrinningsområden.

Figur 15. De sulfidhaltiga jordarna har varierande utseende och är i vissa fall helt svartfärgade och i andra bandade (Fromm 1965). På vissa platser saknar dock de sulfidhaltiga sedimenten den karaktäristiska svarta färgen, sannolikt på grund av att sulfidmineralogin domineras av pyrit. Det gör att sulfidhaltiga sediment inte nödvändigtvis kan identifieras direkt i fält. **A.** Sulfidbandad jord från lokalen Stockarsmyren i Norrbotten (0,6 % svavel). **B.** Helt svartfärgad sulfidjord, även kallad svartmocka. Från lokalen Harrbäcksavan i Norrbotten (1,9 % svavel). **C.** Grå, sulfidhaltiga sediment från lokalen Ersmark i Västerbotten. Hela profilen ner till 180 cm såg ut på detta sätt, och ett prov med pH 6,9 i fält uppvisade vid mätning i laboratorium ett pH på 3,7 efter oxidation. **D.** Svartfärgad sulfidjord under ett ytligt lager av torv, Brännan i Norrbotten (1,3 % svavel). I denna våtmark har sulfidmineralen inte oxiderat vilket sannolikt är en effekt av att grundvattenytan inte påverkats märkbart av dikning.

gränsvärdet för sulfidjord: 0,2 %. Studier av sulfidhaltiga sediment i södra Sverige visar att det där förekommer sediment där pyrit och inte järnmonosulfider är den dominerande järnsulfiden. Pyrit påverkar inte jordarnas färg (Sohlenius & Öborn 2004).

De sura sulfatjordar som påträffades i Västerbotten och Norrbotten karaktäriseras av samma fältkännetecken. Det mest iögonfallande fältkännetecknet är de rostbeklädda sprickor som är typiska för dessa jordar (fig. 3). Ibland påträffades det blekgula mineralet jarosit i anslutning till rostutfällningarna (fig. 16). På många lokaler hittades gamla rotkanaler som var helt inklädda i rost (fig. 16). Sura sulfatjordar påträffades ofta i områden med jordbruksmark och kännetecknas av, att den närmast markytan liggande matjorden underlagras av uppsprucken grynig jord med rostutfällningar (fig. 3). Den gryniga karaktären är sannolikt en effekt av att jordens struktur påverkats av tjäle. Under denna småsprickiga jord finns en zon med större, rostbeklädda, vertikala spricksystem (fig. 3). Dessa rostlager är tjockare och mörkare än den rost som förekommer i ovanliggande jord. Under zonen med rostklädda sprickor finns ofta en zon med ljust grå jord, som längre ner övergår i en mörkt färgad sulfidjord. Denna ljusgrå jord sammanfaller med den övergångszon (tabell 1) där pH stiger mot djupet. Som nämnts ovan kan en högt stående

Figur 16. **A.** Rostutfällningar i en sur sulfatjord i Norrbotten. **B.** Rost samt det blekgula mineralet jarosit. Detta mineral är endast stabilt vid lågt pH (3–4) och indikerar följaktligen att sura förhållanden råder. **C** & **D.** Gamla rotkanaler med utfällningar av järnhydroxider. Dessa utfällningar bildas som en följd av det syre som transporteras ner i jorden via rotkanalerna. Bilderna är tagna från två lokaler på ca 1m djup. pH på prov som togs vid lokalerna sjönk efter oxidation från pH 6,7 till pH 4,6 (högra bilden) och pH 2,9 till pH 1,8 (vänstra bilden).

grundvattenyta förhindra att sura sulfatjordar bildas, och på vissa lokaler hittades sulfidhaltiga sediment direkt under ett lager med torv (fig. 15). De sura sulfatjordar som påträffades i Västerbotten och Norrbotten har samma fältkännetecken som de, som förekommer på andra sidan Bottenviken i Österbotten (jämför figur 3 och figur 4).

Nästan samtliga dokumenterade sura sulfatjordar ligger på platser vilka enligt SGUs jordartskarta utgörs av lera och silt. På ett tiotal lokaler observerades dock sura sulfatjordar i områden som enligt jordartskartan utgörs av andra jordarter. De flesta av dessa lokaler ligger i områden med torv. Sura sulfatjordar påträffades i ett fall i ett område som enligt jordartskartan utgörs av älvsediment, och i ett annat fall i ett område som enligt kartan utgörs av morän. I båda dessa fall ligger observationerna endast ca 20 m från områden som på jordartskartan redovisas som lera och silt.

Resultat från pH-mätningar

I figur 17 visas exempel på de resultat som erhölls vid pH-mätningarna i fält. De sura sulfatjordarna hade ofta ett pH ner mot 3,5 och i vissa fall under 3,0 medan de sulfidhaltiga sedimenten vid mätningarna i fält ofta kännetecknas av pH-värden kring 6–7.

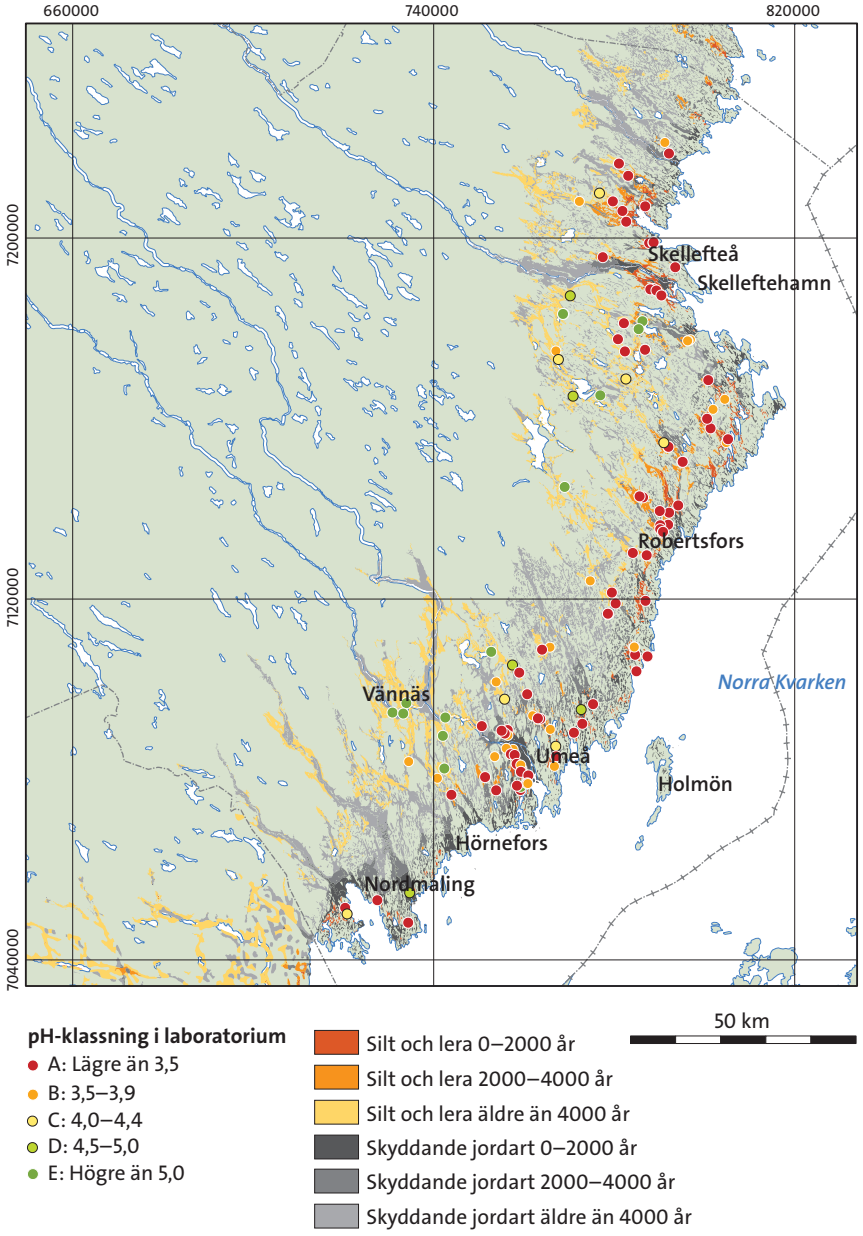
En typisk profil genom en av de undersökta sura sulfajordarna från jordbruksmark redovisas i figur 27 på sidan 46. I matjorden närmast markytan är pH inte speciellt lågt men sjunker däref-

Figur 17. Exempel på pH-mätning i fält. **A.** Sur sulfatjord. **B.** Sulfidhaltig jord. Den sura sulfatjorden kännetecknas av ett lågt pH, medan den sulfidhaltiga jorden kännetecknas av neutralt pH. Då den senare jorden exponeras för luftens syre sjunker dock pH snabbt. De sura sulfatjordarna kännetecknas av sprickor täckta av rostutfällningar, och det blekgula mineralet jarosit. Den sulfidhaltiga jorden är ofta mer eller mindre svartfärgad av sulfidmineral.

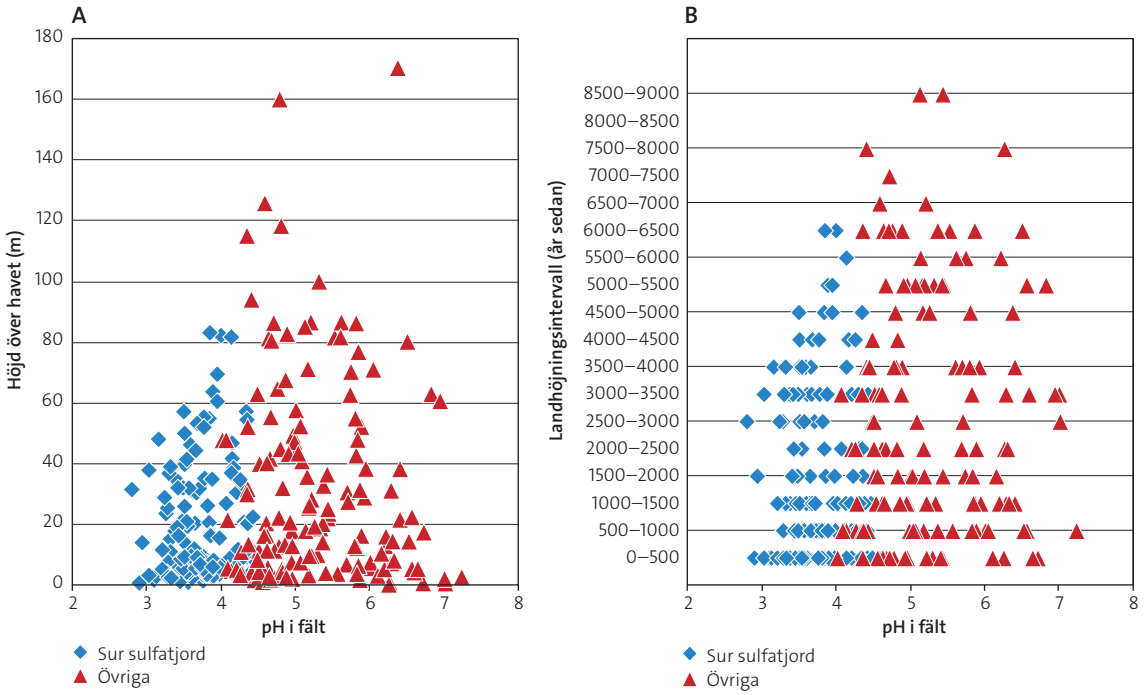
ter mot djupet för att därefter i en övergångszon stiga till ett neutralt pH. I övergångszonen har sedimenten periodvis syresatts, exempelvis på grund av en varierande grundvattennivå. På större djup under grundvattenytan har syre inte kunnat transporteras ner. Opåverkade reducerande förhållanden förhindrar sulfidmineralen från att oxidera, vilket förklarar neutrala pH-värden. Om dessa sulfidhaltiga jordar exponeras för syre sjunker pH kraftigt och de kallas därför ibland *potentiellt sura sulfatjordar* (tabell 1). Detta bekräftas av de låga pH-värden som uppmättes i laboratorium, sedan de sulfidhaltiga proverna fått oxidera i tre månader. pH närmast markytan är ofta högre än i djupare jord, vilket sannolikt beror på att kalk tillförts de övre marklagren för att möjliggöra odling.

Resultat från mätningar i fält

Jordarna har klassificerats som sura sulfatjordar om pH i fält understiger 4,0 (Edén m.fl. 2012). Klassificeringen av sura sulfatjordar baseras dock även på resultat från de pH-mätningar och svavelanalyser som gjordes i laboratorium, på prover från de reducerade sediment som underlagrar de sura, oxiderade jordarna. Det förklarar varför vissa platser med pH 4,0–4,5 klassificerats som sura sulfatjordar, medan andra platser inte fått samma klassificering. Resultaten från de pH-mätningar som utfördes i fält finns sammanfattade i bilaga 2, figur 18 och figur 19 De lägsta, i fält uppmätta, pH-värdena på alla de undersökta lokalerna i Västerbotten och Norrbotten redovisas där. I figur 19 redovisas resultaten från de lägsta pH-värden som uppmättes i fält i förhållande till platsernas höjd över havet. I figur 20 redovisas den statistiska fördelningen av resultaten från de prover, som mättes med avseende på pH både i fält och i laboratorium. De lägsta värden som uppmättes i fält låg på omkring pH 3,0. De suraste jordarna förekom framfö-



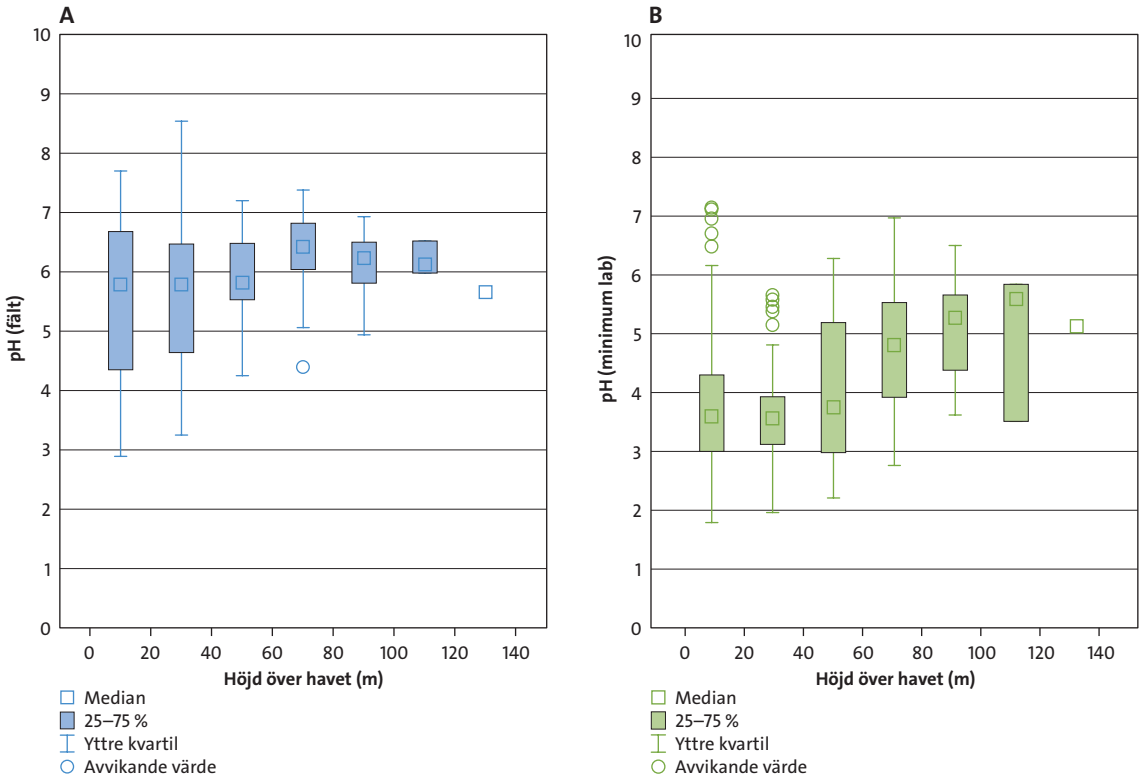
Figur 18. Med utgångspunkt från resultaten av de pH-mätningar som utfördes i fält har de undersökta platserna klassificerats enligt det system, som även används vid Finlands geologiska undersökning (GTK, Edén m.fl. 2012). De lokaler där pH är <4 klassificeras som sura sulfatjordar (Klasserna A och B). Lokaler med pH 4–4,5 klassificeras som sura sulfatjordar om de underlagras av sulfidjord, som efter oxidation får ett pH <4. I bilaga 2 redovisas fler kartor med resultat från de pH-mätningar som utförts i Västerbotten och Norrbotten.



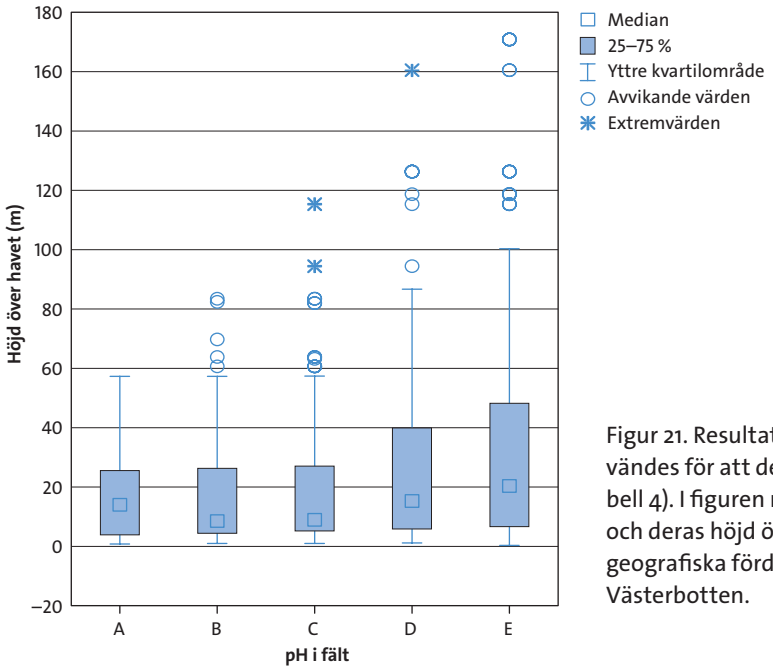
Figur 19. **A.** Lokalernas lägsta pH från mätningarna i fält, i förhållande till höjden över havets yta (m). **B.** Lokalernas lägsta pH i förhållande till tidpunkten (antal år sen) som de undersökta lokalerna torrlades genom landhöjningen. De blå symbolerna visar platser vilka klassificerats som sura sulfatjordar, vilket de platser som representeras av röda symboler inte gjorts. Figuren visar resultat från alla de platser som undersökts i Västerbotten och Norrbotten. Observera att klassificeringen av sura sulfatjordar även baseras på resultat från de pH-mätningar som gjordes i laboratorium. Det förklarar varför vissa platser med pH 4,0–4,5 klassificerats som sura sulfatjordar, medan andra platser i samma pH-intervall inte fått samma klassificering. Endast ett fåtal lokaler med sura sulfatjordar som ligger högre än 60 m ö.h. har dokumenterats.

rallt på låglänta områden som steg ur havet för mindre än 2 000 år sedan. Sju av elva lokaler där de lägsta pH-värdena uppmättes i fält (omkring pH 3) ligger under 15 m ö.h., vilket motsvarar den nivå som havet stod vid för lite mindre än 2 000 år sedan. En av dessa lokaler utgjordes dock av muddermassor som nyligen lagts upp på strandkanten. Men det förekommer även en lokal på nästan 50 m ö.h. där pH ligger nära 3. Dessutom finns tre lokaler med pH omkring 3 på ca 3040 m ö.h. där täcksediment överlagrar de finkorniga sedimenten. Marken där de suraste jordarna påträffades används främst som åkermark eller vall, men det förekom även tre lokaler med skogsmark där pH understiger 3. I figur 21 redovisas resultaten från pH-mätningarna i fält i de fem klasser som definieras i tabell 4 och som även visas på kartan i figur 18 och i bilaga 2.

En stor andel av de undersökta jordar som ligger nära havets yta utgörs av sura sulfatjordar. Andelen undersökta platser som utgörs av denna jordmån, är dock lägre på högre höjder ovan havsytenivån. Endast ett fåtal lokaler med sura sulfatjordar belägna högre än 60 m ö.h. har observerats (fig. 19), vilket innebär att sura sulfatjordar främst förekommer i regioner som är 5 000 år eller yngre (fig. 11). De suraste jordarna med pH under 3,5 hittas nästan uteslutande i områden som ligger under 40 m ö.h. (fig. 19 och figur 21), och därmed torrlagts under de senaste 4 000 åren. Endast två lokaler av 39 med pH under 3,5 återfanns på högre höjd. Sura sulfatjordar är speciellt vanliga, där större sammanhängande ytor med lera och silt förekommer på låga altituder närmast kusten (bilaga 1 och figur 18). Sura sulfatjordar är speciellt frekventa i områden



Figur 20. Varje box representerar samtliga analyserade prover från ett höjdintervall på 20 m (0–20 m ö.h. osv.). **A.** Resultat från samtliga pH-mätningar som utfördes i fält (blåa boxar) och på samma prover. **B.** Resultat från samtliga pH-mätningar som utfördes laboratorium (gröna boxar).



Figur 21. Resultaten från pH-mätningarna i fält användes för att dela in lokalerna i fem klasser (tabell 4). I figuren redovisas de klassade lokalerna och deras höjd över havet. I (fig. 18)redovisas den geografiska fördelningen av de klassade lokalerna i Västerbotten.

vilka används som jordbruksmark. På vissa platser visar fältmätningarna av pH att de finsediment som underlagrar jordbruksmark inte är sura. Detta gäller i stor utsträckning platser som ligger relativt högt ovan dagens havsytenivå. I de högst belägna regionerna hittades, som nämnts ovan, endast i några fall sura sulfatjordar, trots att jordbruksmarken även i dessa områden på sina ställen underlagras av silt och lera. Även närmare kusten på låga altituder förekommer dock jordbruksmark där de översta oxiderade horisonterna inte kännetecknas av lågt pH (fig. 19).

På flera platser var sedimenten ovanför grundvattenytan relativt torra vid mättillfällena, vilket ledde till att det ibland var svårt att uppmäta stabila pH-värden. Ommätningar av dessa prov i laboratorium gav mer rättvisande pH-värden, vilka oftast var lägre än de som noterades i fält.

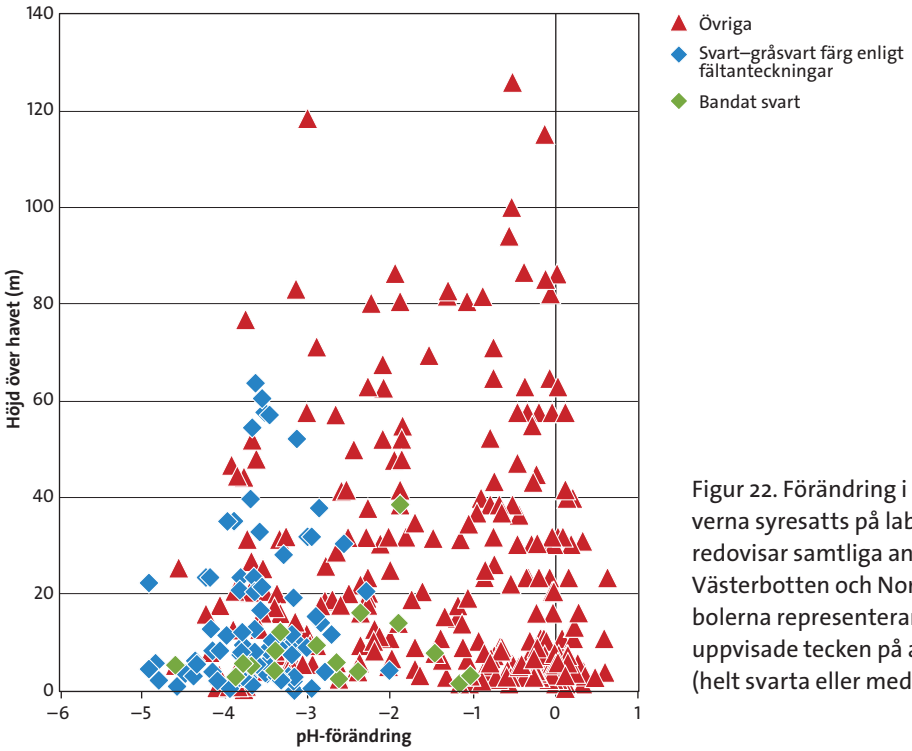
pH-mätningar efter oxidation

I bilaga 2 redovisas kartor med resultat från de pH-mätningar i laboratorium, som utfördes sedan proverna oxiderat. Resultaten från pH-mätningarna i laboratorium har delats in i samma fem klasser som användes för att redovisa resultaten från pH-mätningar i fält. Prover som i fält hade ett pH under 6 men som efter oxidation har ett pH under 4 klassificeras som sulfidjordar. Resultaten från pH-mätningarna i laboratorium har utvärderats tillsammans med resultaten från analyser av svavel.

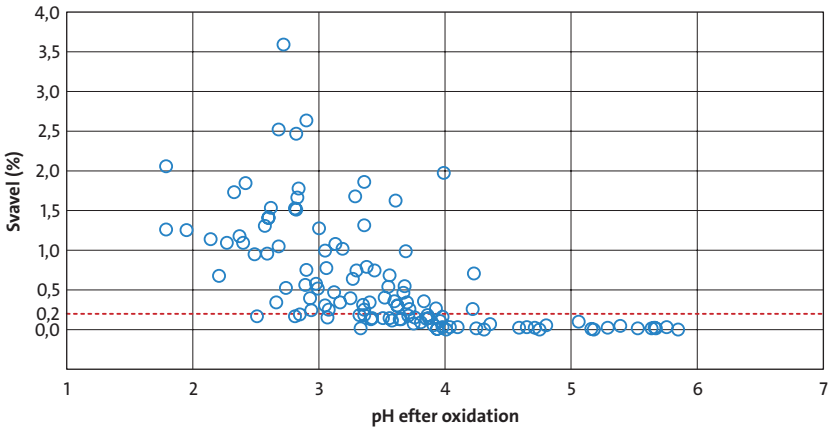
I figur 20 redovisas pH uppmätt i laboratorium som funktion av höjd över havet. Precis som när det gäller de pH-värden som uppmättes i fält, så uppmättes de lägsta pH-värdena på prover från nivåer som ligger lägre än 60 m ö.h. (fig. 20). I ett fall uppmättes i laboratoriet pH-värden under 4 på ett prov som tagits högre än 100 m ö.h., vilket innebär att potentiellt sura jordar påträffades på högre altitud än jordar som var sura i fält.

I figur 22 redovisas den pH-förändring som ägt rum då proverna fått oxidera. De flesta prov som med utgångspunkt från den karaktäristiska svarta färgen i fält bedömdes som sulfidhaltiga (blåa symboler i figur 23), kännetecknades av betydligt lägre pH efter oxidation I flera fall var pH lägre än de lägsta värden som uppmättes i fält, på prover från sura sulfatjordar. Det lägsta uppnådda pH-värdet (1,8) hade ett prov från 180 cm provdjup, från Stockarsmyren i Norrbotten. I fält mättes pH 6,4 på samma prov och det låga pH-värdet är troligtvis en effekt av den höga svavelhalten i detta prov (2 %). Alla prov som noterades som helt svarta eller svartgrå i fält visade en förändring av minst 2 pH-enheter till pH under 4, förutom i ett fall, där pH sjönk till under 4,5. De prov som noterades som bandat svarta i fält, visade en förändring av minst 1 pH-enhet, till pH under 4, vid oxidation. Det innebär att en jämn eller bandad svart–gråsvart färg är ett mycket bra fältkännetecken för sulfidhaltiga sediment. Prover som i fält beskrivits som mörkare grå eller flammiga, gav däremot ingen tydlig indikation på förekomst av sulfidhaltiga sediment. Vissa prover som i fält inte var svartfärgade och därmed inte i fält karaktäriserades som sulfidjordar, uppvisade ändå en markant sänkning av pH efter oxidation, vilket i de flesta fall tolkas som att även dessa prover innehållit sulfidmineral. Det indikerar att det inte alltid är möjligt att enbart med hjälp av den svarta färgen i fält identifiera de sulfidhaltiga jordarna. I Västerbotten påträffades i större omfattning än i Norrbotten sulfidhaltiga sediment som inte karaktäriserades av svart färg (fig. 15C). Vid 89 % av alla lokaler i Norrbotten där sulfidjord förekom enligt klassificeringen i laboratorium noterades i fält svarta–gråsvarta eller bandade, sulfidfärgade sediment någonstans i profilen. I Västerbotten var motsvarande andel endast 46 %, trots att de undersökta profilerna generellt var djupare än i Norrbotten, vilket innebär att reducerade förhållanden bör råda där proverna togs. I Norrbotten är det därmed tydligt att den svarta färgen är en ganska tillförlitlig indikation på sulfidhaltiga sediment.

Prov tagna ovan från de syresatta horisonterna nära markytan, kan inte förväntas innehålla sulfidmineral. På många lokaler uppmättes låga pH-värden i fält från dessa horisonter. Merparten av de prov som hade lågt pH redan i fält hade ofta ungefär samma pH-värden då de analyse-



Figur 22. Förändring i pH efter det att proverna syresatts på laboratorium. Figuren redovisar samtliga analyserade prover från Västerbotten och Norrbotten. De blå symbolerna representerar prover som i fält uppvisade tecken på att vara sulfidhaltiga (helt svarta eller med svarta band).



Figur 23. Svavelhalt och pH uppmätt efter oxidation på laboratorium. Merparten av de prover som efter oxidation har ett pH-värde under 4,0 innehåller minst 0,2 % svavel, vilket indikerar närvaron av sulfidhaltiga mineral (Edén m.fl. 2012).

rades i laboratorium. I vissa fall har pH till och med stigit lite vid mätningen i laboratorium, upp till 0,6 pH-enheter. Eftersom det inte är sannolikt att pH ska stiga som en effekt av oxidation, speglar denna ökning sannolikt mätningarnas osäkerhet. Instrumentet har visserligen en betydligt bättre mätnoggrannhet än 0,6 pH-enheter, men det är i vissa fall svårt att med hög precision mäta pH på jordprover. Vissa prover var exempelvis mycket torra vid mätningen i fält, vilket ger osäkra resultat. Ett fåtal prover som i fält klassificerades som sura sulfatjordar sjönk mer än 1 pH-enhet vid oxidation. Dessa tre prover visade sig alla ha mycket höga svavelhalter (över 1 %), vilket sannolikt betyder att proverna endast delvis hade oxiderat vid mätningen i fält.

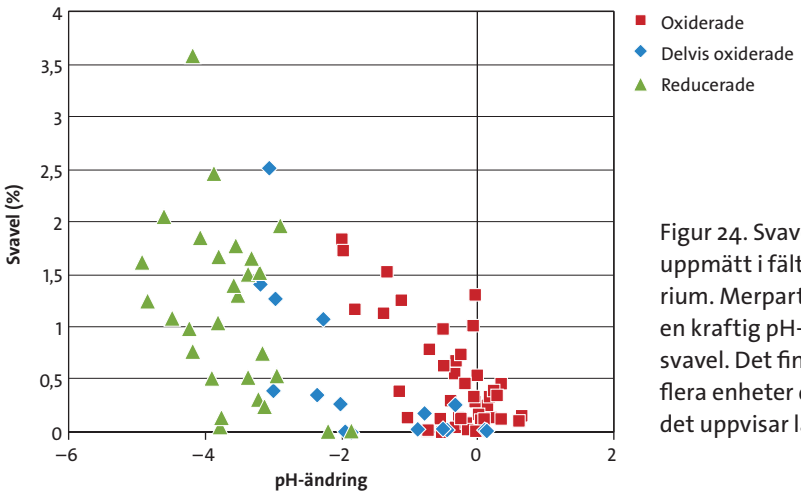
Svavelanalyser

De jordar som innehåller höga halter av svavel (≥0,2 %) kännetecknas framförallt av att pH efter oxidation är under 4 (fig. 23). Endast 2 av 71 prover med svavelhalt på minst 0,2 % hade marginellt högre pH-värden än så (t.ex. pH 4,2). De flesta av proven med en svavelhalt på minst 0,2 % (50 av 71) karaktäriseras också av att pH sjönk med mer än 0,5 pH-enheter efter oxidation (fig. 24). Det förekom även höga svavelhalter i prov som klassificerats som sura sulfatjordar (25 av 71), där pH redan var lågt i fält. Det tolkades som att dessa prover kommer från nivåer som redan i fält delvis oxiderat, men där det svavel som funnits i sulfidmineralen endast delvis bildat svavelsyra och därefter urlakats. Samtliga prov som innehöll monosulfider och var svarta eller gråsvarta i fält (18 st), hade en svavelhalt på minst 0,2 %. Samtliga svartbandade prov blev kraftigt försurade vid pH under 4 efter oxidation, trots att ungefär lika många prov hade svavelhalter under 0,2 % (3 st) som under 0,2 % (4 st).

Det finns alltså prover som inte innehåller stora mängder sulfidmineral, men som ändå kännetecknades av en pH-minskning då de syresattes på laboratoriet (fig. 24). Hälften av proven med låg svavelhalt (<0,2 %) uppvisar också att pH sjunker med under 0,5 pH-enheter efter oxidation (25 av 50). För fyra prov sjönk pH med under 2 pH-enheter efter oxidation till pH under 4, trots låga svavelhalter (0,15 %–0,01 %). Det förekom ibland fler prov från samma lokal som uppvisade detta mönster, vilket tyder på att det inte handlar om felmätningar. Från lokalen Lillfjärden uppvisade t.ex. ett prov från 50 cm provdjup (svavelhalt 0,03 %) en pH-ändring från 4,9 till 3,9, medan ett prov från 140 cm provdjup (svavelhalt 0,14 %) visade en pH-ändring från 7,3 till 3,5, trots låga svavelhalter.

Generellt är det tydligt att prov som klassificerats som sulfidjord hade högre svavelhalter än de som klassificerats som sur sulfatjord. Medelvärdet för svavel i 27 prov från sulfidjordar var 1,2 %, med en standardavvikelse på ca 0,8 %. Medianvärdet för sulfidjordarna var 1,1 % svavel. Av 41 prov med sur sulfatjord var medelvärdet 0,5 % svavel, med en standardavvikelse på 0,5 %. Medianvärdet för sur sulfatjord låg på 0,3 % svavel. Prov från övergångszonen, 18 prover som delvis oxiderats, uppvisade en väldigt stor spridning där standardavvikelsen på 0,8 % svavel var högre än medelvärdet 0,7 %. Medianvärdet i övergångszonen var 0,4 % svavel.

Resultaten visar följaktligen att även jordar med relativt låg svavelhalt (< 0,2 %) kan vara kraftigt försurade (fig. 23), och därmed klassas som potentiellt sura sulfatjordar. Dessa jordar ligger dock i områden där sulfidhaltiga jordar förekommer och det är troligt att den försurande



Figur 24. Svavelhalt och skillnad mellan pH uppmätt i fält och efter oxidation på laboratorium. Merparten av de prover som uppvisade en kraftig pH-sänkning innehåller minst 0,2 % svavel. Det finns dock prover där pH sjönk flera enheter då de oxiderade, men som trots det uppvisar låga svavelhalter.

effekten på något sätt är kopplad till oxidation av sulfidmineral. En tänkbar förklaring till detta är att proverna i fält var reducerade och innehöll tvåvärt järn (Fe^{2+}) som då proverna oxiderade bildade trevärt järn (Fe^{3+}), en process som leder till att pH sjunker enligt nedanstående reaktion.

Formel 3

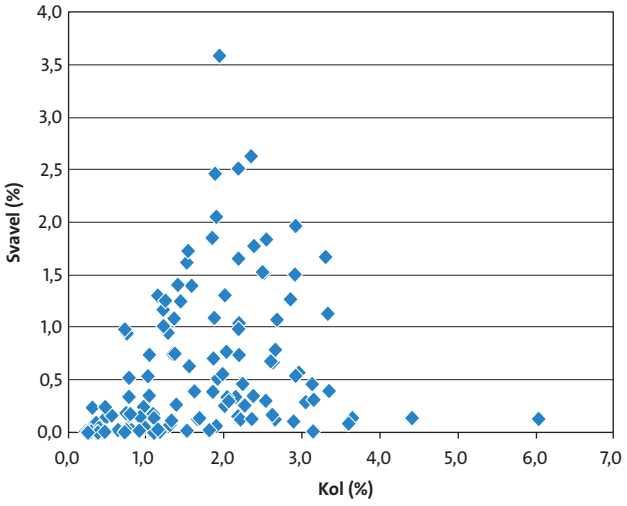
$$Fe^{2+} + 1/4O_2 + 3/2H_2O \rightarrow FeOOH + 2H^+$$

Eftersom Fe^{2+} bildas vid oxidation av sulfidmineral är det högst sannolikt att denna jon kan förekomma i höga koncentrationer i vissa av de undersökta profilerna. Det är dock klart att prover med en svavelhalt över 0,2 % i samtliga fall får ett pH nära eller under 4 efter att de exponerats för luftens syre i laboratorium (fig. 23). Höga svavelhalter är därmed ett säkert indicium på att en jord är potentiellt försurande i det undersökta området. I andra regioner kan dock jordarna vara bättre buffrade och en hög svavelhalt behöver inte nödvändigtvis betyda att en jord är potentiellt försurande.

Total kolhalt

Figur 25 redovisar halterna kol och svavel i samtliga analyserade prover (sammanlagt drygt 120 prover). Det kol som analyserats kommer till övervägande delen från organiskt material. En annan källa skulle kunna varit kol från kalcit eller andra karbonatmineral. Det finns dock inga indicier på att de här analyserade proverna innehåller karbonatmineral. De halter av kalcium (Ca) som uppmätts i denna undersökning (se avsnittet under) är betydligt lägre än de som uppmättes av Lax & Sohlenius (2006) på prover från Uppsalatrakten, vilka innehöll kalcit. Det faktum att de i fält reducerade provernas pH sjunker kraftigt då proven exponeras för luft, visar att de har en låg buffrande förmåga, vilket indikerar att proverna inte innehöll signifikanta mängder karbonatmineral.

Med undantag av sju prover innehåller alla prover med en svavelhalt över 0,2 % minst 1 % kol (fig. 25) vilket visar att sulfidmineral förekommer i de prover som innehåller en viss andel organiskt material. Det finns däremot en hel del prover med relativt hög kolhalt som inte innehåller sulfidmineral. I flera fall beror det på att dessa prover kommer från nivåer som i fält var syresatta, vilket lett till att det svavel som tidigare funnits i jorden lakats ut. Det organiska material som finns i de sulfidhaltiga sedimenten har lett till reducerande förhållanden, som i sin tur



Figur 25. Halterna av kol och svavel i samtliga analyserade prover från Västerbotten, Västernorrland och Norrbotten.

lett till att sulfidmineral kunnat bildas. Detta har skett i samband med att sedimenten ackumulerades på Österjöns botten.

Prover som innehåller mer än 2 % organiskt material kan klassificeras som gyttjelera eller, då lerhalten är låg, gyttjesilt. En organisk halt på 2 % motsvarar ungefär en kolhalt på 1 %, vilket innebär att de flesta sulfidhaltiga jordar kan klassificeras som gyttjejordar. Det gäller med all sannolikhet även de sura sulfatjordar som ursprungligen varit sulfidhaltiga.

Profildata: pH och svavel

Här presenterar vi fyra profiler: Blåmissusjön, Djäkneboda, Drängsmark och Granån (fig. 26). Dessa lokaler har klassificerats som sura sulfatjordar vilka underlagras av sulfidhaltiga sediment. Samma profiler har även analyserats med avseende på en rad grundämnen (se avsnittet nedan).

Med utgångspunkt från pH och S-halt har profilerna delats in i tre enheter: oxiderad sur sulfatjord (OZ), övergångszon (TZ) och reducerade sulfidhaltiga sediment (RZ). Zonindelningarna är ungefärliga och kan variera med tiden. TZ följer t.ex grundvattenytans dynamiska läge, och utgör därför en zon som kan vara periodvis oxiderad och periodvis reducerad. Lokalerna provtogs under slutet av en torrperiod och visar därför sannolikt en relativt låg nivå för TZ.

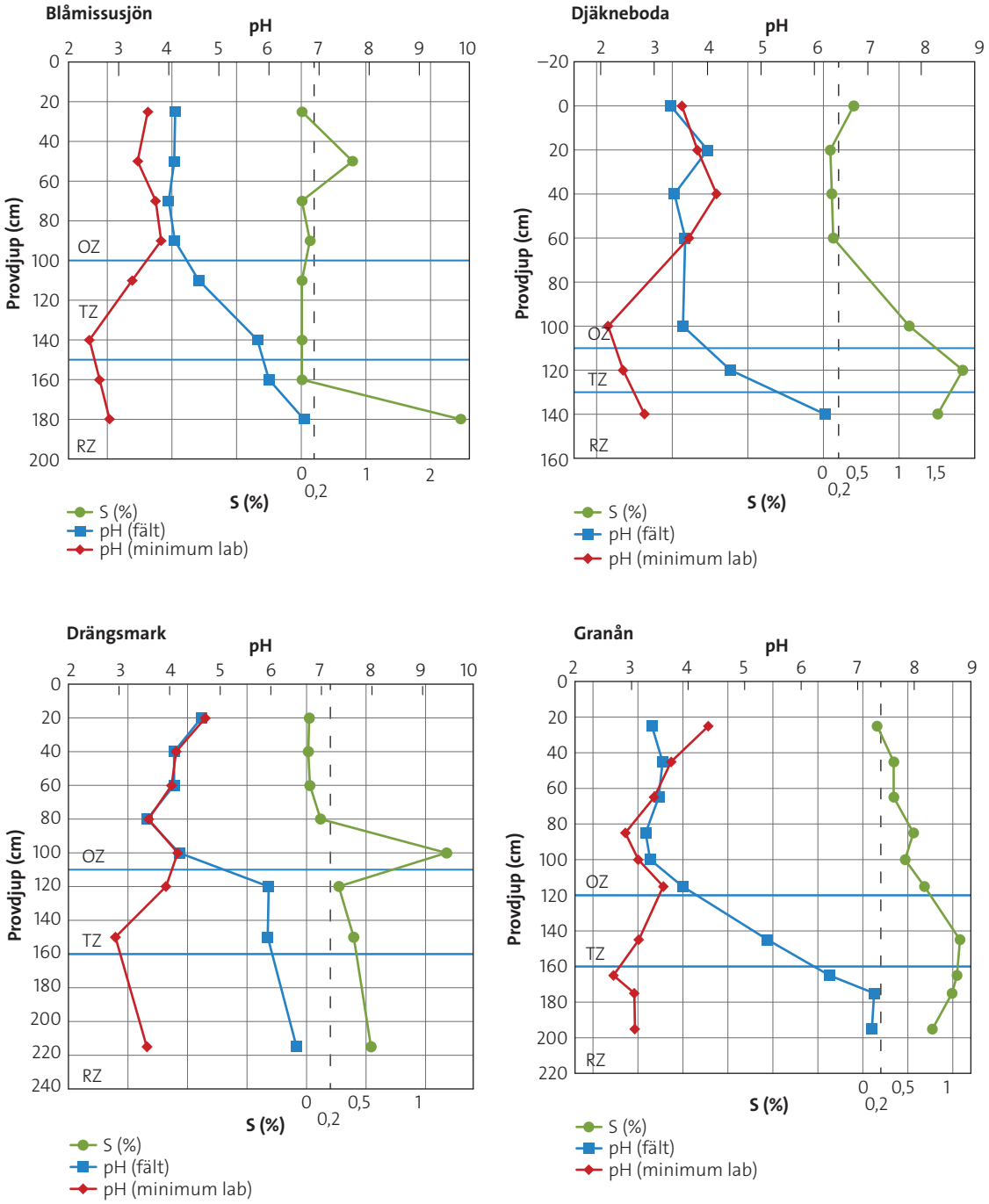
Alla dessa fyra lokaler ligger på platser där grundvattenytan sänkts genom dikning. De tre sistnämnda lokalerna ligger på åkermark medan Blåmissusjön ligger på en plats som tidigare använts som jordbruksmark. Lokalerna ligger relativt nära dagens havsytenivå i områden som under de senaste 3 000 åren torrlagts genom landhöjningen.

Mätningar av pH i fält och efter oxidation på laboratorium visar att de olika lagren i varje profil skiljer sig markant: de övre (oxiderade) jordlagren visar relativt homogena pH-värden vid mätningar före och efter oxidation, medan de djupare, reducerade lagren har stor potential att bilda sur avsättning vid oxidation. De övre lagren är generellt sura med pH ≤4–5, medan de reducerade lagren har pH≥6. Ett kriterium för klassning av sulfidhaltiga sediment är att svavelhalten uppgår till ≥0,2 %, detta är markerat med en streckad lodrät linje i diagrammen (fig. 26). Svavelhalten ökar generellt i de reducerade, djupare sedimentlagren, men tenderar också att visa högre koncentrationer i t.ex. övergångszonerna på ca 80–120 cm provdjup för lokaler som Blåmissusjön, Drängsmark och Granån (fig. 26). Vid Drängsmark och Granån överlagrades sulfatjorden av ett mörkare matjordslager till ca 20 cm provdjup och lokalen vid Blåmissusjön överlagrades av ett ca 20 cm tjockt torvtäcke.

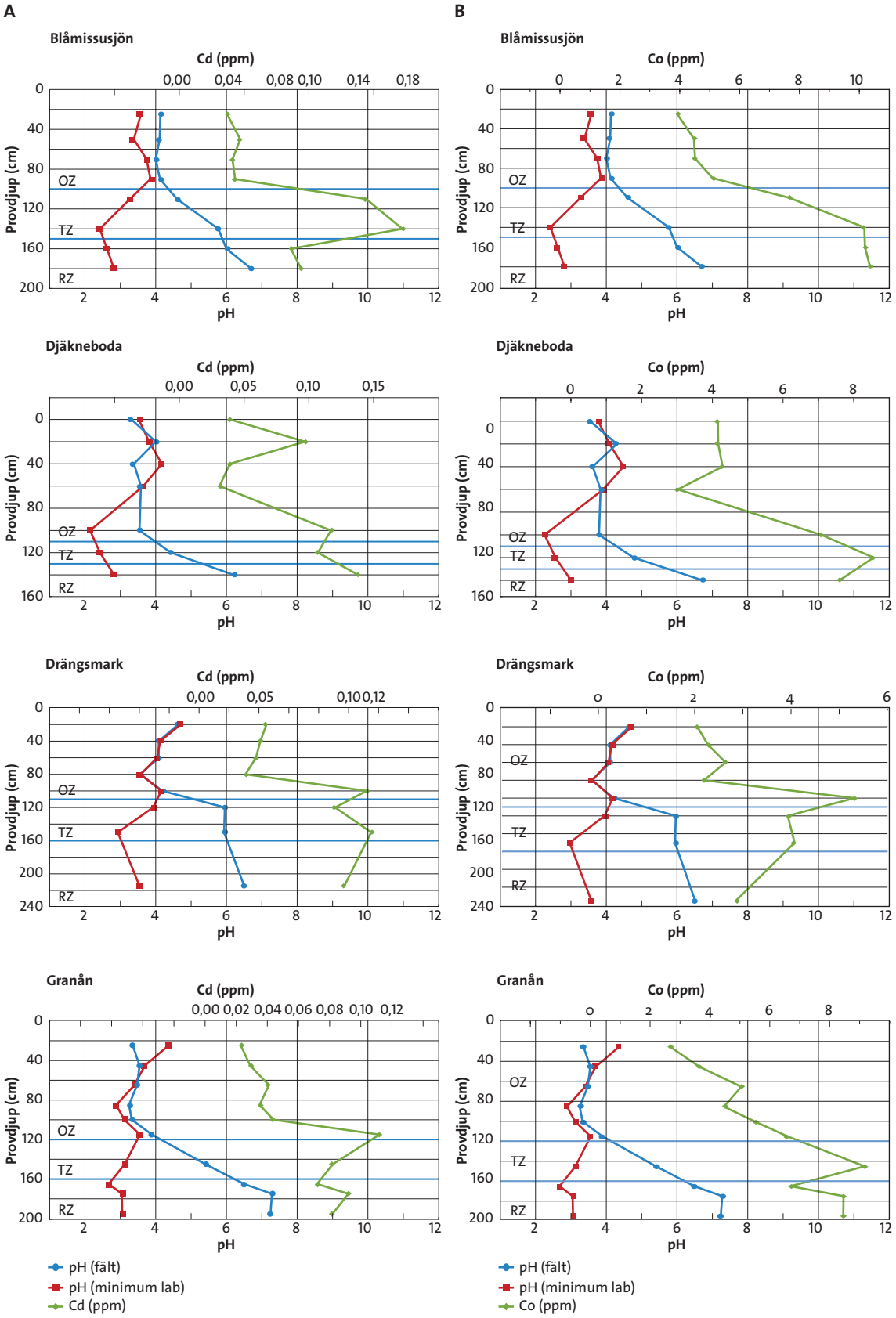
Geokemin hos sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment

Från lokalerna Blåmissusjön, Djäkneboda, Drängsmark och Granån har geokemiska data för koppar (Cu), nickel (Ni), kobolt (Co), arsenik (As), silver (Ag), kadmium (Cd), magnesium (Mg), aluminium (Al), titan (Ti), krom (Cr), mangan (Mn), järn (Fe), zink (Zn) samt sällsynta jordartsmetaller (REE) tolkats i jordprofilerna. Halterna av kadmium, kobolt, nickel och titan från de fyra lokalerna redovisas i figur 27, sällsynta jordartsmetaller i (fig. 28) och övriga grundämnen redovisas i bilaga 3. Det finns dessutom resultat från ett antal andra lokaler (fig. 10) samt av ytterligare grundämnen vilka inte redovisas i denna rapport. Dessa resultat finns dock tillgängliga i SGUs databaser. Analyserna har utförts efter syralakning (7M HNO_3) vilket är en metod som ger partialhalter, och sedimentens totalhalter kan därför förväntas vara något högre än de som redovisas här. Parametrar som spelar roll för den geokemiska sammansättningen i sediment är bl.a. kornstorlek, mineralsammansättning, halten organiskt material och grundvattennivå.

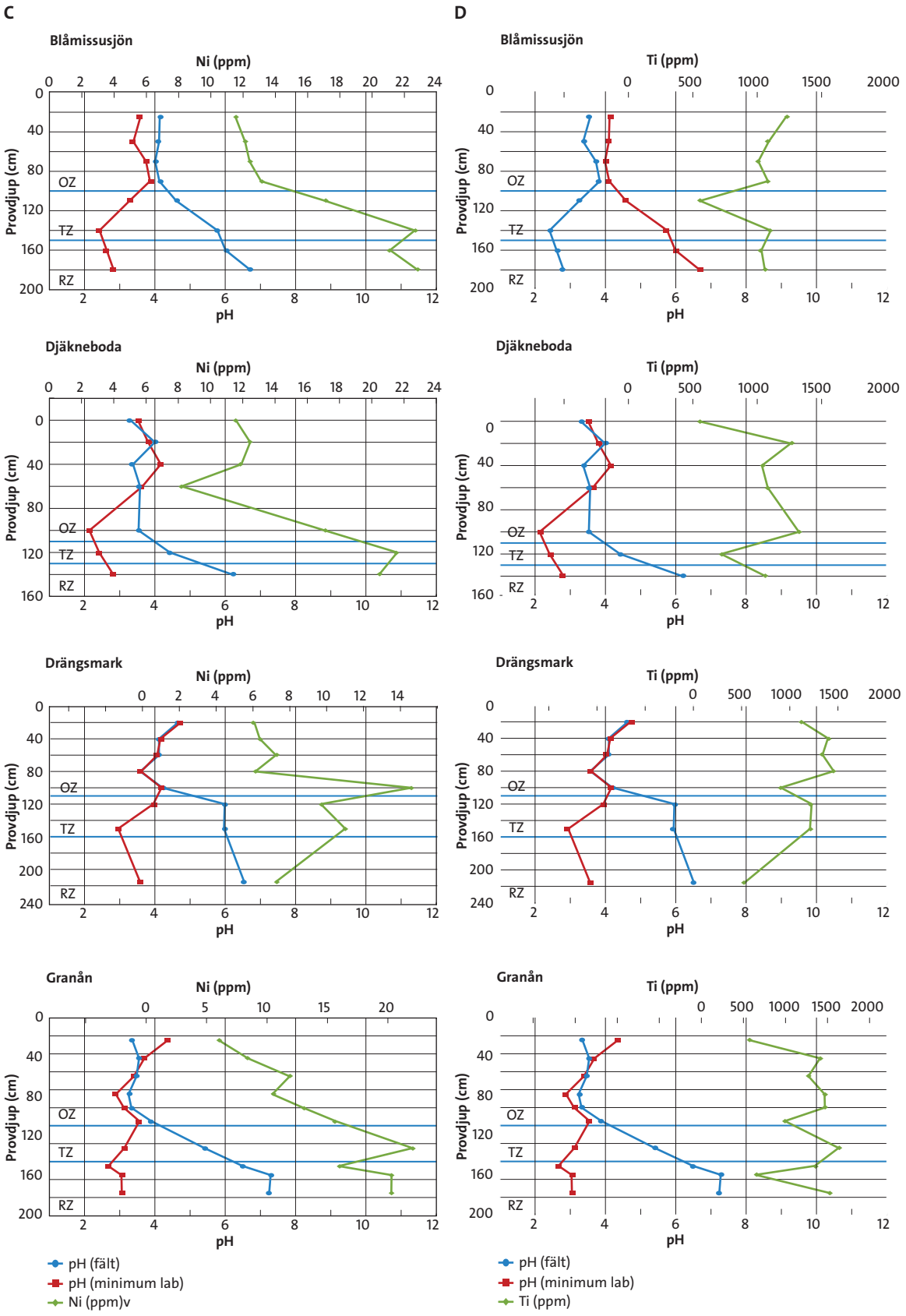
Tidigare undersökningar har visat att sällsynta jordartsmetaller och metaller som aluminium, kobolt, mangan, nickel, zink och, i något lägre grad, koppar tenderar att mobiliseras från sura sulfatjordar (t.ex. Nordmyr m.fl. 2008, Åström 2001). När dessa metaller spolas ut i lokala



Figur 26. Mätvärden för pH från fält, pH efter oxidation på laboratorium, samt svavelhalt från fyra typlokaler: Blåmissusjön, Djäkneboda, Drängsmark och Granån. Dessa har typisk jordprofil för sura sulfatjordar: ett övre lager med oxiderad sulfatjord (OZ), en övergångszon (TZ) kring grundvattenytan och ett djupare jordlager med reducerade sulfidhaltiga sediment (RZ).



Figur 27. Halterna av **A.** kadmium (Cd), **B.** kobolt (Co), **C.** nickel (Ni) och **D.** titan (Ti) i jordprofiler från lokalerna Blåmissusjön, Djäkneboda, Drängsmark och Granån. De undersökta profilera är typiska, sura sulfatjordar: ett övre lager med oxiderad sulfatjord (OZ), en övergångszon (TZ) kring grundvattenytan och ett djupare jord-



lager med reducerade, sulfidhaltiga sediment (RZ). En jämförelse mellan halterna i RZ och i OZ visar att Cd, Co och Ni mobiliserats från lagret med sur sulfatjord, medan Ti inte mobiliserats i någon synbar utsträckning. Halterna redovisas som ppm, d.v.s. milligram per kilo torkad jord.

vattendrag från de oxiderade sedimenten kan de påverka det akvatiska ekosystemet. Titan och krom har lägre mobilitet, då dessa metaller ofta är bundna i mer vittringsbeständiga mineral (Åström 1998), medan andra grundämnen (t.ex. järn och arsenik) vilka frigörs i de sura sulfatjordarna till stor del kan förväntas bindas i svårlösliga oxider.

Resultaten från de sura sulfatjordar som undersökts här visar att flera grundämnen förekommer i lägre halter i den oxiderade zonen jämfört med underliggande reducerade sediment, vilket indikerar att dessa grundämnen lakats ut.

Aluminium

Aluminium (Al) visar något lägre koncentrationer nära övergångszonen, något som tyder på att metallen har lakats ut nära grundvattenytan (bilaga 3). Skillnaden mellan halterna i den oxiderade och reducerade zonen är dock relativt liten vilket tyder på att endast en liten andel av detta grundämne lakats ut från de undersökta sura sulfatjordarna.

Magnesium, krom och titan

Magnesium (Mg), krom (Cr) och titan (Ti) visar liknande geokemiska mönster i jordprofilerna (fig. 27D och bilaga 3). Alla dessa metaller är vanligt förekommande i svårvittrade mineral. De lägsta koncentrationerna uppträder i övergångszonen. Med ökande jorddjup in i de reducerade sedimenten återfinns högre koncentrationer igen för lokalerna Blåmissusjön, Djäkneboda och Granån. För Drängsmark återfinns de lägsta halterna ovan övergånszonen och ökar något nedåt i profilen, för att sedan minska nedåt i de reducerade sedimenten. Dessa grundämnen har sannolikt endast i liten utsträckning lakats ut från de undersökta sura sulfatjordarna, och de variationer som syns i profilerna kan vara orsakade av variationer i sedimenten kornstorlek (en finkornig jord kan förväntas innehålla högre halter lakbara grundämnen jämfört med ett grovkornigt sediment).

Silver

Silver (Ag) visar generellt ökade koncentrationer med ökande jorddjup i den oxiderade jorden, med högst halter nära övergångszonen. Djupare ned, i de reducerade sedimenten, bibehålls eller minskar koncentrationerna. För Blåmissusjön och Granån kopplar silver något mot pH i den reducerade zonen – lägre pH ökar mobiliteten hos silver. I den oxiderade zonen syns dock högre koncentrationer, som troligtvis har rört sig från ytligare jordlager på grund av oxidationen.

Järn

Vid kemisk vittring har järn (Fe) i form av Fe^{2+} en tendens att bilda oxider i den oxiderade sulfatjorden, vilket förklarar de rostutfällningar som är vanligt förekommande i sura sulfatjordar. Järn rör sig i varierande grad från den oxiderade jorden till underliggande jordlager. I lokalerna Blåmissusjön, Djäkneboda och Granån är koncentrationerna lägre kring övergångszonen (TZ), och viss urlakning kan ha skett, medan koncentrationerna åter ökar nedåt i de reducerade sedimenten. För lokalen Drängsmark återfinns toppkoncentrationerna strax ovanför de reducerade sedimenten, likt andra lättlakade metaller (Co, Ni, Zn) på samma lokal.

Mangan och arsenik

Halterna av mangan (Mn) och arsenik (As) varierar genom jordlagren men uppvisar ingen tydlig skillnad mellan oxiderad och reducerad jord. Även om det sedan tidigare är känt att mangan lakas ur av sura sulfatjordar (Åström 1998) indikerar våra resultat att endast en mindre andel mangan lakats ut från de undersökta sura horisonterna och att variationerna i halter genom profilen kan bero på andra faktorer, t.ex. variationer av kornstorlek eller mineralsammansättning.

Kobolt, nickel och zink

För lokalerna Blåmissusjön, Djäkneboda och Granån är koncentrationerna för kobolt (Co), nickel (Ni) och zink (Zn) (fig. 27B och C, bilaga 3) generellt högre i den reducerade zonen än i den oxiderade zonen, vilket indikerar att urlakning har skett av dessa metaller. För profilen Drängsmark yttrar sig en tydlig zon med omfördelade, höga koncentrationer i den djupare delen av den oxiderade jorden, medan längre ned i de reducerade sedimenten återgår koncentrationerna till ungefär samma som i den oxiderade zonen.

Kadmium och koppar

Kadmium (Cd) visar tre till fyra gånger högre koncentrationer i närheten av grundvattenytan än i de oxiderade övre lagren, i alla jordprofiler (fig. 27A). För Djäkneboda ökar koncentrationerna med jorddjupet nedåt i de reducerade lagren. Resultaten indikerar urlakning av kadmium från den oxiderade sulfatjorden. Koppar (Cu) förekommer med högre koncentrationer nära övergångszonen vilket tyder på att koppar har urlakats, särskilt nära grundvattenytan.

Sällsynta jordartsmetaller

De sällsynta jordartsmetallerna (REE [*rare earth elements*], lantan, cerium, praseodym, neodym, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, tulium, ytterbium och lutetium) visar intressanta mönster i profilerna (fig. 28A–D). Lantan (La) och cerium (Ce) är de vanligast förekommande REE i naturen och bildar egna mineral, anrikas ofta i lerrika jordar, samt adsorberar till järnoxider och fosfater. Deras geokemiska mönster i sedimentprofilerna skiljer sig mot övriga analyserade REE, vilket dels påvisar att de generellt förekommer i högre koncentrationer, men också att de har högre lakbarhet i salpetersyra för det material som analyserats jämfört mot övriga REE (vilka i sig visar mycket stark korrelation, oftast >90 %). Den högre lakbarheten för lantan och cerium beror troligtvis på att dessa jordartsmetaller förekommer i mer lättlösliga mineral. För t.ex. lokalen Granån tenderar högre lakade koncentrationer av lantan och cerium motsvara lägre pH-värden för oxiderade prov, vilket kan tyda på att lantan och cerium förekommer i lättlösliga mineral från denna jordprofil. Koncentrationerna för övriga REE förblir dock låga på grund av låg urlakning från kemiskt vittringsbeständiga mineral. Vissa REE, som ytterbium och holmium, uppvisar lägre halter i den oxiderade zonen jämfört med underliggande, reducerade sediment, vilket tyder på att dessa grundämnen lakats ut från den sura jorden.

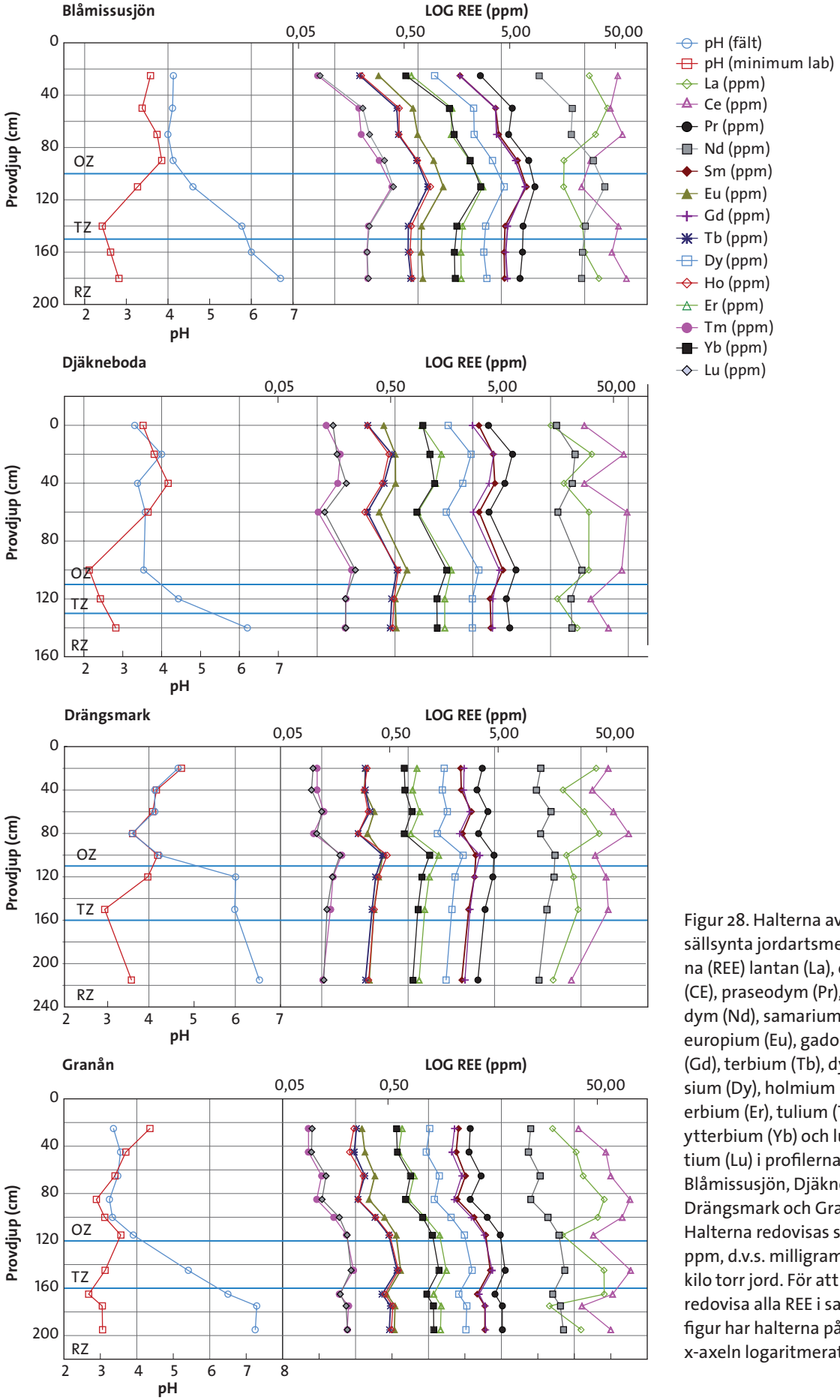
Resistivitetsmätningar

Resultaten visar att den kustnära lokalen där de sulfidhaltiga sedimenten förekommer kännetecknas av en hög elektrisk ledningsförmåga, medan lokalen med finkorniga sedimenten på högre altituder kännetecknas av lägre ledningsförmåga. Tidigare resultat från resitivitetsmätningar av Sohlenius m.fl. (2007) visar även de att de sulfidhaltiga sedimenten i både Västerbotten och Norrbotten kännetecknas av en låg resistivitet. Orsaken till den låga resistiviteten är sannolikt främst att jordarnas porvatten har en relativt hög salthalt, eftersom de avsatts i bräckt vatten.

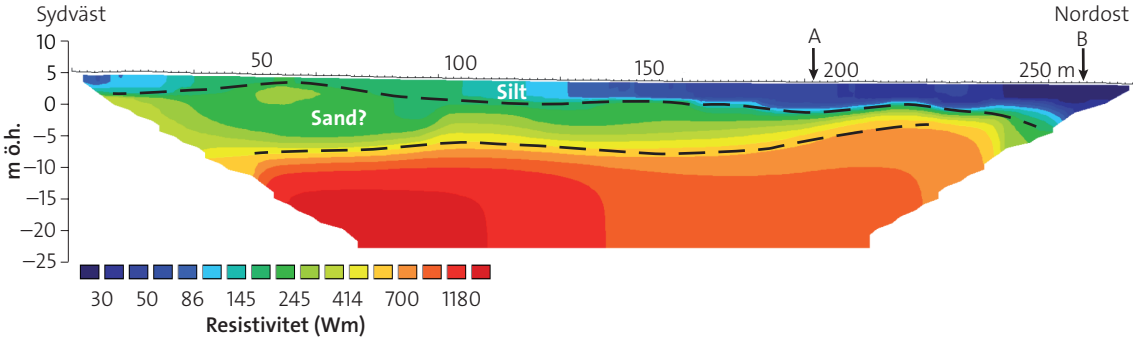
Rutvik

Profilen i Rutvik är uppmätt på åkermark, jordarten är enligt jordartskartan lera och silt. Profilen startar precis vid kanten av ett isälvsediment och fortsätter mot nordost mot ån Storbrograven (fig. 29). Den sydvästra delen av profilen ligger ca 5 m ö.h. nivån sjunker sedan till ca 2 m ö.h. vid Storbrograven.

Resistivitetsmodellen i figur 29 visar en nästintill horisontell lagring, med en ökande resistivitet mot djupet. Tre lager har tolkats in i modellen. Överst ett lager med mycket låg resistivitet (20–150 Wm) som troligtvis motsvarar silt och lera. Resistiviteten är lägst i slutet av profilen,



Figur 28. Halterna av de sällsynta jordartsmetallerna (REE) lantan (La), cerium (CE), praseodym (Pr), neodym (Nd), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), tulium (Tm), ytterbium (Yb) och lutetium (Lu) i profilerna från Blåmissusjön, Djäkneboda, Drängsmark och Granån. Halterna redovisas som ppm, d.v.s. milligram per kilo torr jord. För att kunna redovisa alla REE i samma figur har halterna på x-axeln logaritmerats.



Figur 29. Resultaten från resistivtetsmätningarna har använts för att tolka jordarterna och deras mäktighet. Resistivitetsmodell för lokalen Rutvik.

Tabell 5. Värdena visar uppmätt pH före och efter oxidation, på jordprov tagna från olika djup längs mätsträckan. Läget för provtagningsplatserna är markerade i figur 29.

	pH före oxidation		pH efter oxidation		Total svavelhalt %
Djup	A	B	A	B	A
50 cm		6,6		3,3	
70 cm	4,3		4,1		0,03
200 cm		6,8		2,3	

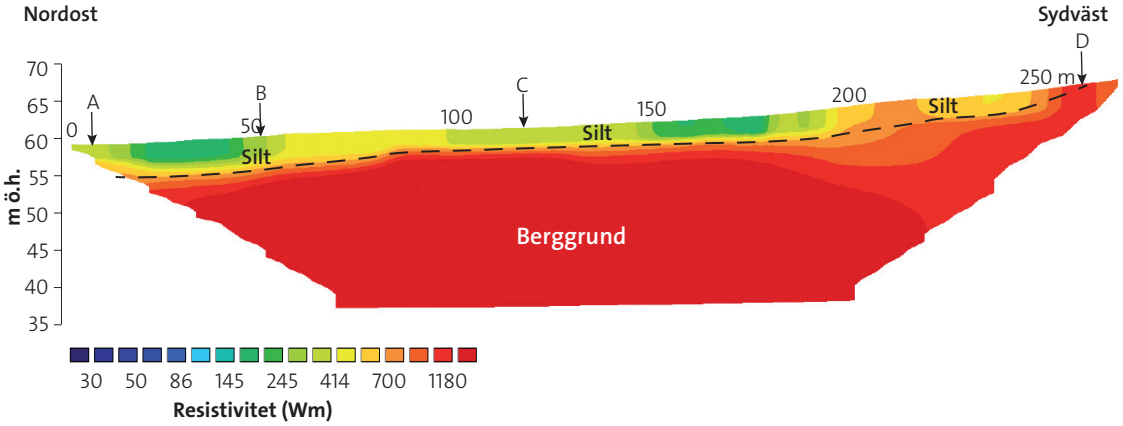
närmare ån. Under det finns ett lager med något högre resistivitet (150–700 Wm) som kan motsvara sand. På ca 10–15 m djup stiger resistiviteten (>1000 Wm), vilket indikerar berg alternativt morän.

På två ställen längs profilen har jordprover tagits från olika djup (A och B i figur 29). På punkt B dokumenterades silt i de ytligare proven och lera på 200 cm djup. Resultat från pH-mätning visar att punkt A (tabell 5) kan klassificeras som en sur sulfatjord. På både punkterna A och B uppmätes i fält pH-värden nära 7 som sjönk flera enheter efter att proverna syresatts på laboratoriet (tabell 5). Det resultatet indikerar att det finns sulfidhaltiga sediment på platsen. På punkt B uppmättes i fält ett pH-värde på ca 6,6. På laboratorium uppmättes senare pH 3,3 på ett prov från samma nivå. Det visar att sedimenten på denna punkt är reducerade även nära markytan. I prover från lokal B uppmättes dessutom svavelhalter på över 1 % (tabell 5) vilket definitivt visar att sedimenten är sulfidhaltiga.

Klöverträsk

Även profilen i Klöverträsk (i Rosåns avrinningsområde) är uppmätt på åkermark, och jordarten är även här enligt jordartskartan silt och lera. Profilen sträcker sig från nordost mot sydväst och slutar precis vid övergången till morän. Den nordöstra delen av profilen ligger ca 60 m ö.h. och nivån stiger sedan till ca 70 m ö.h. vid slutet av profilen. Denna lokal ligger följaktligen något över de altituder där sura sulfatjordar är vanligt förekommande (se ovan).

Resistivitetsmodellen i figur 30 visar i huvudsak två lager. Överst ett lager med relativt låg resistivitet (150–800 Wm) som följs av ett lager med mycket hög resistivitet (>1000 Wm). De höga värdena indikerar berggrunden, och jorddjupet är cirka fem meter längs profilen. På fyra ställen längs profilen har jordprover har tagits på olika djup (A–D i figur 30). Jordarten är silt i samtliga prover och pH-mätning efter oxidation visar värden som varierar mellan 4,8 och 5,7 (tabell 6).



Figur 30. Resultaten från mätningarna av resistivitet har använts för att tolka jordarterna och deras mäktighet. Resistivitetsmodell för lokalen Klöverträsk.

Tabell 6 Värdena visar uppmätt pH efter oxidation på jordprov tagna från olika djup längs profilen. Läget för provtagningsplatserna är markerade i figur 30.

	pH efter oxidation		
Djup	A	B	C
40 cm	5,4		5,5
70 cm	5,2	5,2	5,2
200 cm			4,8

På denna lokal var det av tekniska skäl inte möjligt att mäta pH i fält. Resultaten från pH-mätningar på laboratorium visar dock att jordarna från Klöverträsk inte kan klassas som sura sulfatjordar. I ett prov från 200 cm under markytan uppmättes pH 4,8 vilket kan betyda att pH sjunkit som en effekt av oxidation av sulfidmineral (tabell 6). Detta värde ligger dock mer än två pH-enheter högre än de som uppmättes på syresatta prover från Rutvik (tabell 6).

En jämförelse mellan de två profilerna visar, att resistiviteten i de ytliga lagren är betydligt lägre för profilen vid Rutvik där också sulfidhaltiga jordarter konstaterats. Den lägre resistiviteten beror sannolikt främst på högre salthalt i porvattnet, men det är även tänkbart att jordarna i Rutvik har andra egenskaper som bidrar till den låga resisitiviteten (t.ex. högre ler- och vattenhalt).

Sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar i Västernorrlands län

I en pilotstudie i Västernorrland 2011 mättes pH och svavelhalt på några platser enligt samma metodik som använts i Västerbotten och Norrbotten. Resultaten visar att sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment förekommer i Västernorrland. Resultat från analyser av ytterligare prover, som samlats in inom SGUs jordartskartering, visar också att sulfidhaltiga sediment förekommer i länet.

Enligt ”Beskrivning till jordartskartan Bjästa” (Norrlin, SGU i manus) uppträder sulfidjordar här huvudsakligen i tre urskiljbara miljöer: 1) Sulfidhaltiga lergyttjor och gyttjeleror, längs sanka, långgrunda stränder vid havsvikar eller nyligen avsnörda sjöar; 2) Förekomster som påträffas någon till några tiotal meter över nuvarande havsyta, och någon till några meter ner i marken, under redan oxiderad sulfidjord eller tunna lager av yngre sediment; 3) Förekomster

som utgörs av smala, endast några decimeter mäktiga band av sulfidlera vilka har påträffats flera meter under markytan i nipor och raviner.

Intrycket av de studier som gjorts är att sura sulfatjordar är mindre vanligt förekommande i Västernorrland jämfört med Västerbotten och Norrbotten. Sannolikheten att vattendrag påverkas negativt av dessa jordar får betecknas som mindre, även om det inte kan uteslutas att en sådan påverkan lokalt förekommer. För att få en säkrare bild av hur vanligt förekommande sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar är i Västernorrland krävs dock ytterligare undersökningar. En orsak till att denna jordmån inte är så vanlig i Västernorrland kan vara, att detta län jämfört med Norrbotten och Västerbotten är relativt kuperat vilket gör att sulfidhaltig silt och lera främst uppträder i smala dalgångar, där de täckts av sediment som svallats ut från omgivande höjdområden. Dessa sediment skyddar underliggande sulfidhaltig jord från att syresättas. Detta antagande stöds av de observationer som gjorts av Norrlin (SGU i manus).

DISKUSSION

Resultaten från denna undersökning har använts för att uppdatera de riskkartor som tidigare tagits fram. Denna riskbedömning har använts för att beräkna i hur stor andelen av avrinningsområdena, som det är sannolikt att sura sulfatjordar förekommer. Resultaten kan användas för att identifiera vattendrag där vattnet periodvis kan vara påverkat av sura sulfatjordar.

Geografisk fördelning av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment

Undersökningarna i Västerbotten och Norrbotten visar att sura sulfatjordar främst förekommer i områden med finsediment, belägna relativt nära dagens havsytenivå. I figur 19, figur 21, figur 22 och bilaga 2 redovisar resultat från pH-mätningar i fält och laboratorium. Av dessa framgår som ovan nämnts att jordar med lägst pH främst förekommer på lägre höjder än ungefär 60 m ö.h. (fig. 19), dvs. i områden som torrlagts genom landhöjningen under de senaste drygt 5 000 åren. Jordar klassade som sura sulfatjordar förekommer dock upp till 80 m ovanför dagens havsytenivå (fig. 19).

I denna diskussion används både platsernas höjd över havet och ålder för att ringa in var det är stor sannolikheten att sulfidhaltiga sedimenten förekommer. Eftersom landhöjningens hastighet har varierat och fortfarande varierar inom det undersökta området, så motsvarar en viss höjd över havet inte en bestämd ålder för strandens nivå i hela det undersökta området. I tabell 7 redovisas strandens nivå från tre platser vid ett antal tidpunkter. I den södra delen av det undersökta området har landhöjningen varit och är snabbast, och avtar sedan mot norr, vilket framgår av de siffror som redovisas i tabell 7.

I figur 31 och figur 32 redovisas andelen sura sulfatjordar respektive sulfidhaltiga sediment som funktion av landskapets ålder. I figurerna redovisas de klassificerade lokalerna belägna i varje tusenårsintervall (lokaler som torrlades för 0–1 000 år sedan osv.). Även figur 31 visar att sura sulfatjordar är vanligast förekommande i områden som torrlagts under de senaste 5 000 åren, dvs. på höjdnivåer lägre än 55–60 m ö.h.. Det finns inga observationer av sura sulfatjordar från platser som är äldre än 6 500 år, dvs. från lokaler som ligger högre än ca 80 m ö.h. (fig. 19). Det är dock viktigt att notera att relativt få lokaler har besökts på nivåer äldre än 5 000 år (sammanlagt 41 lokaler, se fig. 31). Från områden som är mellan 6 500 och 9 000 år finns endast sju undersökta lokaler, medan det finns data från närmare 300 lokaler belägna i områden yngre än 5 000 år. Det kan därför inte uteslutas att vissa områden med sura sulfatjordar även förekommer på nivåer äldre än 6 500 år. Sulfidhatiga jordar har dokumenterats på nivåer som ligger mer än 100 m ö.h. och som torrlades för närmare 8 000 år sedan (fig. 32). Sulfidjordar har därmed observerats på lokaler som ligger högre än den högst belägna lokalen med sur sulfatjord, vilket indikerar att även sura sulfatjordar kan förekomma på högre höjder. Både då det gäller sura sul-

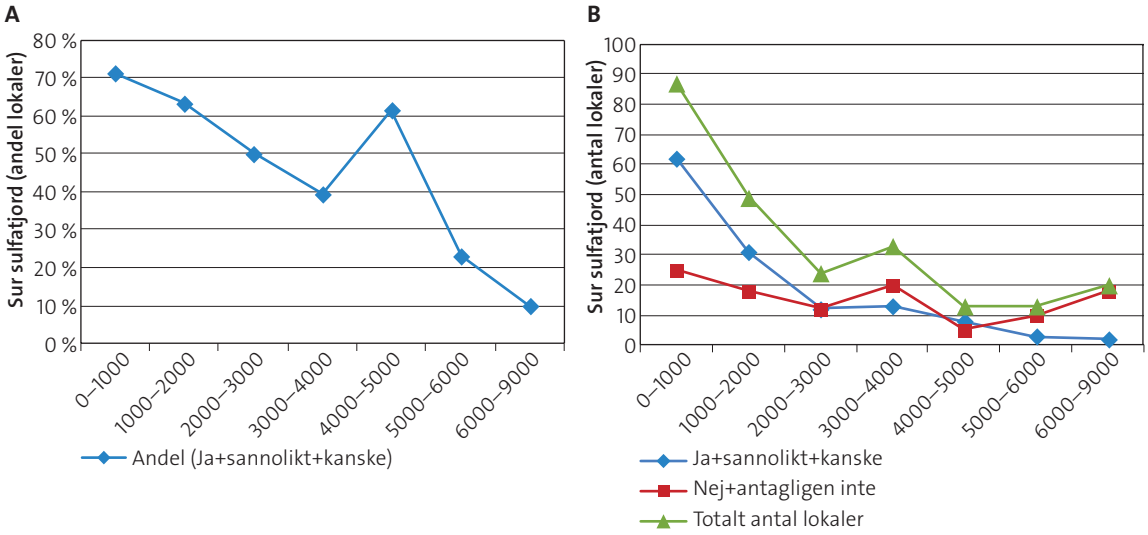
Tabell 7. Strandens nivå (m ö.h.) vid ett antal tidpunkter, på tre platser i det undersökta området. Värdena kan användas för att få en uppfattning om regionala skillnader mellan ålder på strandens nivå och höjd över havet. Nordmaling ligger i den sydligaste delen av den undersökta regionen, medan Haparanda ligger i den nordligaste delen. Tabellen har tagits fram med hjälp av SGUs strandförskjutningsmodell (Påsse & Andersson 2005).

Ålder (år före nutid)	Nordmaling (m ö.h.)	Piteå (m ö.h.)	Haparanda (m ö.h.)
9 000	142	127	122
8 000	118	107	103
7 000	97	88	85
6 000	78	70	68
5 000	61	55	53
4 000	45	41	40
3 000	32	29	28
2 000	20	18	17
1 000	9	8	8

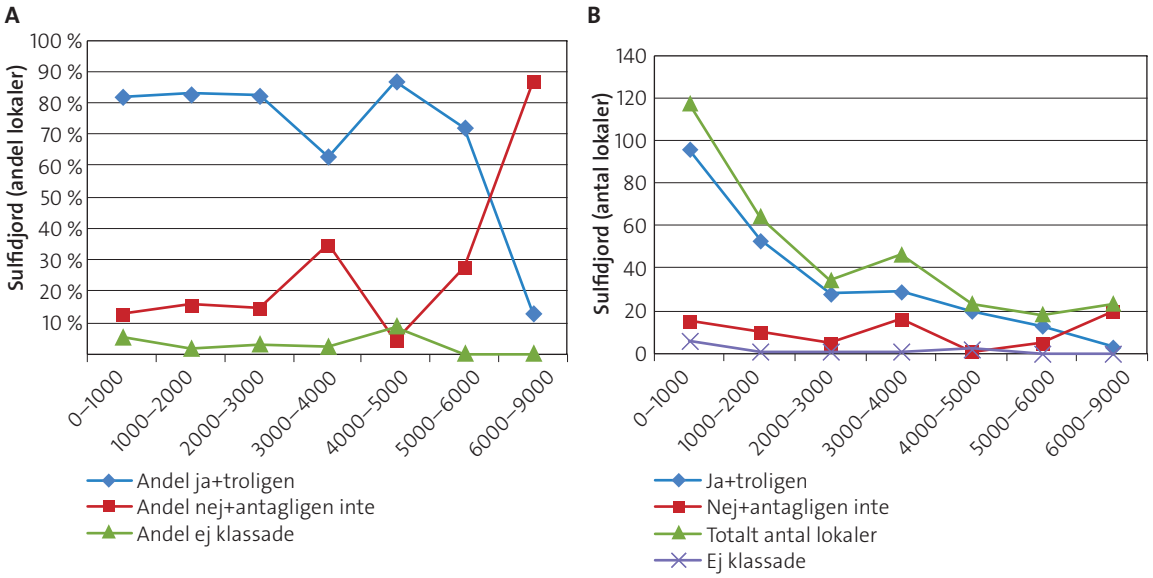
fatjordar och sulfidhaltiga sediment finns endast ett fåtal observationer från de äldsta områdena. I figur 31 och figur 32 redovisas därför alla klassificerade lokaler som torrlades för mellan 6 000 och 9 000 år sedan som en punkt.

I tidigare publikationer har den marina gränsen ibland angetts som den övre gränsen för förekomster av sulfidhaltiga sediment (Öborn 1994). I det här undersökta området ligger den marina gränsen ungefär 125 till 160 m ovanför dagens havsytenivå. Nivån för den marina gränsen varierar geografiskt inom det undersökta området, eftersom landhöjningens hastighet uppvisar en geografisk variation. Resultaten som presenteras i denna rapport visar tydligt att sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment inte är vanligt förekommande på nivåer nära den marina gränsen. Det förklaras av att de sulfidhaltiga sedimenten i stor utsträckning har avsatts på stort vattendjup, alltså i områden som ligger flera tiotal meter under den marina gränsen. Det bör dock påpekas att lergyttjor och gyttjeleror avsatta i grunda havsvikar ofta innehåller sulfidmineral. Sediment från Norrbotten, avsatta i sådana miljöer beskrivs också av Fromm (1965). Det gör att det är möjligt att det finns lokala förekomster av sulfidhaltig lergyttja och därmed sura sulfatjordar också på nivåer nära den marina gränsen.

Resultat från den litteraturstudie som tidigare presenterats av Ivarsson m.fl. (1996) indikerar också, att sulfidhaltiga sediment främst förekommer på nivåer som ligger relativt nära dagens havsytenivå. Denna litteraturstudie var en viktig grund till den indelning i olika riskklasser som SGU tidigare tagit fram (fig. 12, Sohlenius m.fl. 2011). De data som presenteras i den här rapporten är insamlade och analyserade på ett enhetligt sätt, vilket gör att det nu är möjligt att dra säkrare slutsatser om sulfidjordarnas geografiska fördelning. Sohlenius m.fl. (2011) delade in ler- och siltjordarna i tre risklasser. Där betraktas det som mest sannolikt att sulfidjordar förekommer i områden som är yngre än 2 000 år (fig. 12). De resultat som presenteras i denna rapport indikerar att det inte är någon större variation i andelen sura sulfatjordar och sulfidjordar belägna på lera och silt inom områden som är yngre än 5 000 år (fig. 31). Vi föreslår därför att sannolikheten för att dessa sura jordar ska förekomma, kan betraktas som lika stor i alla områden med lera och silt som är yngre än 5 000 år. De allra suraste jordarna i denna studie påträffades visserligen i områden som torrlagts under de senaste ca 4 000 åren (fig. 19), men skillnaden är så pass liten inom områden som är yngre än 5 000 år att det inte finns anledning att påstå att den problematik som sura sulfatjordar förorsakar är störst på de allra lägsta nivåerna. Även om inte sura sulfatjordar påträffats på lokaler äldre än 6 500 år, får övre gränsen för var dessa jordar kan förekomma betraktas som mycket osäker, då endast ett fåtal lokaler på högt belägna nivåer har besökts. I de områden som varit torrlagda



Figur 31. Förekomsten av sura sulfatjordar som funktion av tidpunkterna då de undersökta lokalerna torrlades genom landhöjningen. **A.** Antal lokaler där sura sulfatjordar dokumenterades, som funktion av landskapets ålder. Dessutom redovisas det totala antalet undersökta lokaler i varje åldersintervall. **B.** Andelen dokumenterade sura sulfatjordar i olika åldersintervall. Lokaler som överlagras av täcksediment (t.ex. torv) har inte tagits med i analysen. Observera att det sista ålderintervallet motsvarar 3 000 år, jämfört med 1 000 år för de tidigare intervallen. Detta eftersom det endast finns ett fåtal observationer från de äldsta tidsintervallen.



Figur 32. Förekomsten av sulfidhaltiga sediment som funktion av tidpunkterna då de undersökta lokalerna torrlades genom landhöjningen. A) Antal lokaler där sulfidhaltiga sediment dokumenterades, som funktion av landskapets ålder. Dessutom redovisas det totala antalet undersökta lokaler i varje åldersintervall. B) Andelen observerade sulfidjordar i olika åldersintervall. Observera att det sista ålderintervallet motsvarar 3 000 år jämfört med 1 000 år för de tidigare intervallen. Detta eftersom det endast finns ett fåtal observationer från de äldsta tidsintervallen.

under längst tid skulle det följaktligen behövas ytterligare observationer, för att säkerställa i vilken utsträckning sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar förekommer. För närvarande samlar SGU data från andra aktörer (t.ex. Trafikverket) som visar var sulfidhaltiga sediment förekommer. Då dessa data sammanställts finns det förhoppningsvis förutsättningar för att identifiera den övre gränsen för var sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment förekommer.

Resultaten visar att SGUs jordartskarta kan användas för att lokalisera områden där sura sulfatjordar förekommer. Det bör dock påpekas att syftet med denna undersökning inte varit att utvärdera jordartskartan, som istället har används som ett hjälpmedel för att identifiera lämpliga lokaler. Det innebär att det kan finnas mindre områden med lera och silt som inte redovisas på jordartskartan, och där sura sulfatjordar kan ha bildats. I några fall påträffades sura jordar på platser med lera och silt, där det enligt jordartskartan finns torv, älvsediment eller morän. Då det gäller de två sistnämnda jordarterna, är antagligen den gränsdragning mellan jordarter som redovisas på jordartkartan inte korrekt. De flesta lokaler med torv där sura sulfatjordar påträffades ligger nära kusten. På dessa platser är torvlagren tunna eftersom områdena relativt nyligen stigit ur havet. Torven har därmed inte kunnat förhindra att sura sulfatjordar har bildats då områdena dikats.

Även i områden som enligt SGUs jordartskarta utgörs av lera och silt och är yngre än 5 000 år finns många lokaler där sura sulfatjordar inte dokumenterats (fig. 19, fig. 31). Det kan finnas flera orsaker till det. En orsak till att de översta horisonterna inte alltid har lågt pH kan vara, att sulfidjorden vid landhöjningen överlagrats av svall- eller älvsediment, vilka saknar sulfidmineral. Närmast Lule älv finns exempelvis många lokaler där sura sulfatjordar inte har bildats (fig. 1 i bilaga 2). Det kan bero på att de sulfidhaltiga sedimenten där täckts av älvsediment. Den tolkningen stöds av att det finns tidigare observationer, som visar att sulfidhaltiga sediment förekommer nära älven (fig. 12A). En annan orsak kan vara att de övre jordlagren på vissa lokaler kan ha varit exponerade för syre under lång tid (hundratals år), vilket gör att effekterna av sulfidoxidationen har minskat eller helt försvunnit. Detta är speciellt troligt just i närheten av vattendrag som har eroderat sig ner i de finkorniga sedimenten, och därmed skapat en naturlig dränering av omgivande finsediment.

I Norrbotten är andelen lera och silt av den totala landarealen som störst i områden som är yngre än 5 000 år (fig. 13), medan dessa jordar i Västerbotten är vanligast förekommande på högre nivåer, som är äldre än 5 000 år. I Norrbotten är dessutom andelen lera och silt kring 20 %, och i vissa åldersintervall över 30 % i områden yngre än 5 000 år. Motsvarande andel i samma åldersintervall är betydligt lägre i Västerbotten (10–15 %). Detta återspeglas även i den högre andelen lera och silt i de kustnära delavrinningsområdena i Norrbotten (bilaga 1). Då det gäller andelen lera och silt i huvudavrinningsområdena syns däremot ingen större skillnad mellan de två länen. Detta eftersom dessa större avrinningsområden sträcker sig längre inåt land mot den marina gränsen. Eftersom sura sulfatjordar bedöms vara vanligast i områden som torrlagts under de senaste 5 000 åren (fig. 19 och fig. 31), finns det anledning att misstänka att fler kustnära vattendrag i Norrbotten än i Västerbotten är negativt påverkade av sura sulfatjordar. Det är dock väl känt att det i båda länen förekommer vattendrag som har påverkats av dessa jordar (Filppa 2012, Myrstener 2012).

De resistivitetsmätningar som har utförts visar att en lokal på en plats med sulfidjordar (Rutvik) kännetecknas av låg elektrisk resistivitet, medan den lokal som ligger i ett område där sulfidjordar inte har kunnat påvisas (Klöverträsk), uppvisar högre elektrisk resistivitet. Liknade resultat har tidigare rapporterats från platser längst Norrlandskusten och i Mälardalen (Sohlenius m.fl. 2007). Det skulle dock behövas ytterligare sådana undersökningar för att bättre verifiera sambandet mellan resistivitet och förekomsten av sulfidhaltiga sediment. En möjlighet kan eventuellt vara att göra fördjupade analyser av de resisitvitetsmätningar från flyg, som SGU har utfört över delar av Västerbottens och Norrbottens kustregioner. Sådana analyser har redan genomförts i Finland (Beucher m.fl. 2013 och 2014).

De områden i Norrbotten och Västerbotten som enligt SGUs jordartskarta utgörs av lera och silt, och som torrlagts under de senaste 5 000 åren redovisas i figur 33. Med bakgrund av resultaten från denna undersökning är det i dessa områden som sannolikheten är störst för att påträffa sura sulfatjordar. Den totala arealen lera och silt i områden yngre än 5 000 år, i de två länen, är 1 260 km². Av figur 31 framgår att drygt 50 % av de besökta lokalerna i områden med lera silt yngre än 5 000 år, utgörs av sura sulfatjordar. Detta innebär att det lågt räknat finns minst 600 km² med sura sulfatjordar i de två länen. Det kan dock finnas mindre områden med lera och silt, som inte registrerades vid jordartskarteringen och som därmed inte redovisas på kartan. Dessutom kan sura sulfatjordar ha bildats i områden vilka på jordartskartan redovisas som torv. Det gäller speciellt i områden med låga altituder där tjocka torvlager inte har hunnit bildas. Den totala arealen sura sulfatjordar bedöms därför vara större än 600 km².

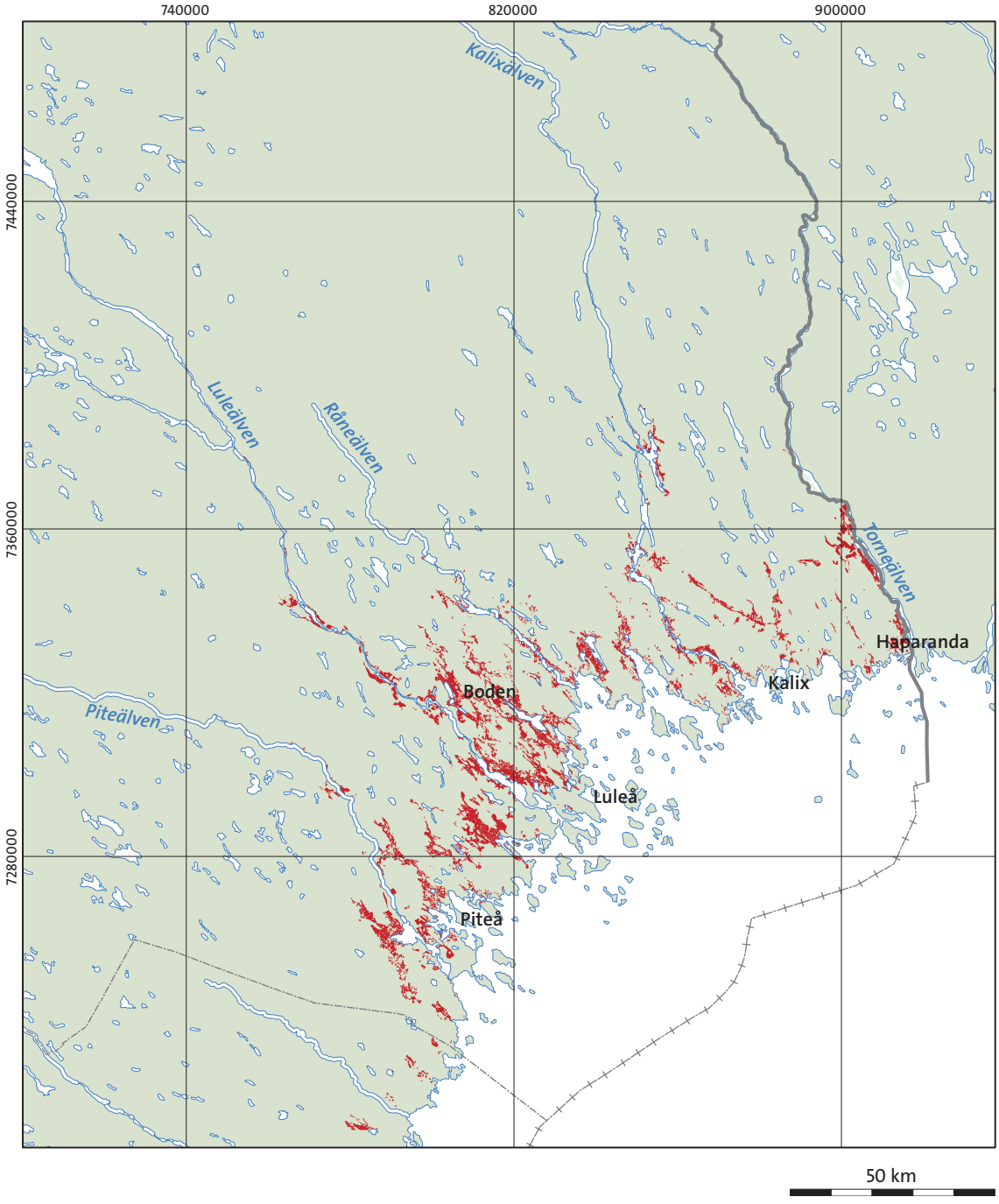
I bilaga 4 redovisas andelen lera och silt yngre än 5 000 år i de två länens huvud- och delavrinningsområden. Kartona i bilaga 4 kan jämföras med dem som redovisas i bilaga 1 och i figur 14, där andelen av all lera och silt (oavsett ålder) i avrinningsområdena redovisas. Speciellt då det gäller andelen lera och silt i Västerbottens län, syns en tydlig skillnad mellan kartorna som redovisas i de två bilagorna. Detta eftersom det i det länet finns relativt mycket lera och silt i områden som är äldre än 5 000 år. Eftersom sura sulfatjordar även påträffats i områden som är äldre än 5 000 år kan det dock inte uteslutas att vattendrag i vissa äldre områden (se bilaga 1), med en hög andel lera och silt, också är påverkade av sura sulfatjordar.

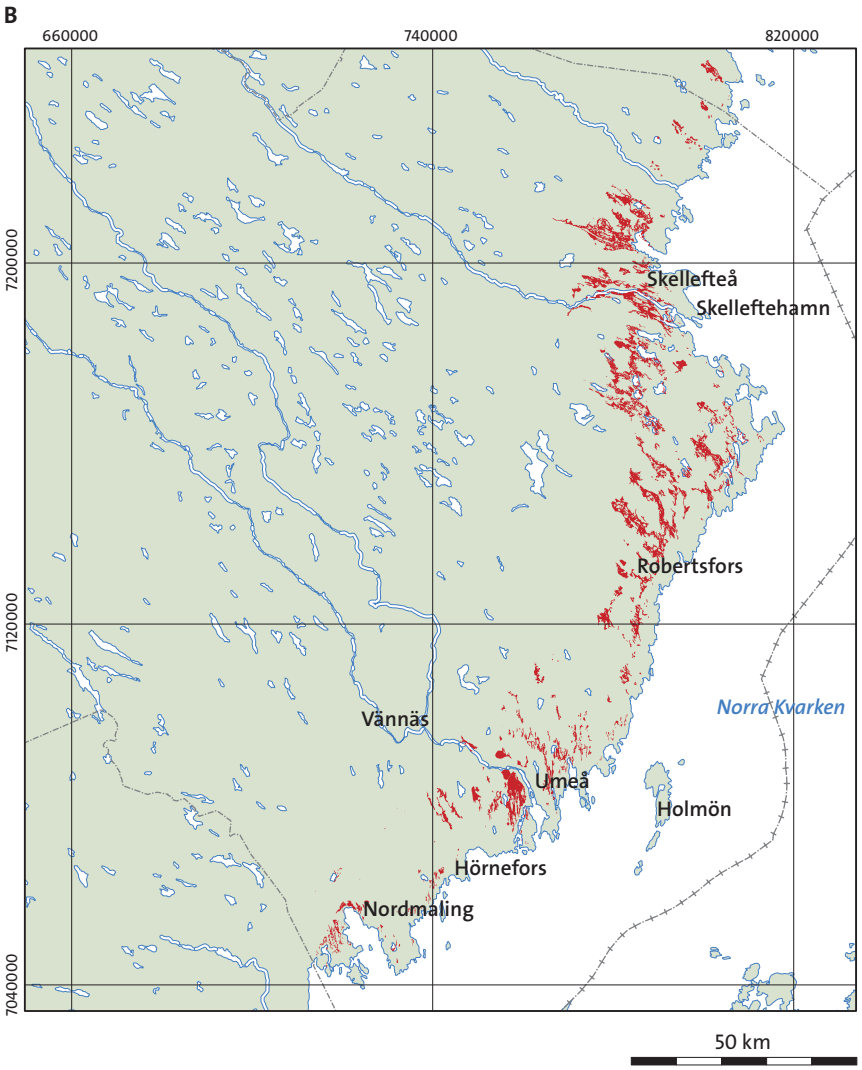
Markanvändning och sura sulfatjordar

Sura sulfatjordar har bildats både i områden som utgörs av jordbruksmark och skogsmark. På flera platser påträffades sura sulfatjordar i områden som sannolikt tidigare använts som åkermark, med som idag är bevuxen med ung skog (fig. 5). Detta visar att oxiderande markförhållanden fortsätter att råda, trots att diken sannolikt inte underhålls. En starkt bidragande orsak till detta är att vattenupptaget från träden leder till att grundvattenytan hålls nere. Ett syfte med denna studie var att fastställa om det finns skillnader i pH och djup till reducerande lager mellan sura sulfatjordar i skogsmark och på jordbruksmark. Det har dock inte gått att se några sådana skillnader mellan skogsmark och jordbruksmark då det gäller jordarnas egenskaper. Ett större dataunderlag skulle eventuellt kunna göra det möjligt att identifiera skillnader mellan sura sulfatjordar i områden med olika markanvändning. Klart är dock att dessa sura jordar bildas i alla områden med silt och lera där grundvattenytan sänkts med diken. Sulfidhaltiga sediment förekommer främst i terrängens lägsta partier, där grundvattenytan naturligt står nära markytan. Grundvattenytan har därför i många områden sänkts för att förbättra skogstillväxten eller för att möjliggöra uppodling. I samband med fältarbetet observerades diken i anslutning till lokalerna med sura sulfatjordar. Dessa diken framträder även tydligt i Lantmäteriets höjdmodell. I många områden med jordbruksmark förekommer dessutom täckdiken, vilka bidrar till att hålla grundvattenytan nere. Genom att kombinera SGUs jordartskarta med Lantmäteriets höjdmodell är det möjligt att identifiera lera och silt i områden yngre än 5 000 år, och som dessutom påverkats av diken. I bilaga 4 visas andelen jordbruksmark i del- och huvudavrinningsområden som utgörs av silt och lera och som torrlagts under de senaste 5 000 åren. Eftersom det finns en hel del lera och silt med annan markanvändning, främst skog, där grundvattennivån är påverkad av diken, vore det värdefullt att identifiera alla dikade områden med dessa jordarter. Kartorna ger dock, tillsammans med information om förekomsterna av all lera och silt yngre än 5 000 år (fig. 33 och bilaga 4), en vägledning om vilka vattendrag som kan tänkas vara påverkade av sura sulfatjordar. Intrycket från fältarbetet visar att en mycket stor andel av leran och silten i de två länen är påverkad av diken.

Det är även tydligt att sura sulfatjordar inte är vanligt förekommande i våtmarker som inte påverkats av dikning. I våtmarker förekommer sulfidhaltiga sediment nära markytan eller direkt

A


740000
820000
900000
7440000
7360000
7280000
Kalixälven
Luleälven
Råneälven
Torneälven
Piteälven
Haparanda
Kalix
Boden
Luleå
Piteå
50 km



Figur 33. Lera och silt från SGUs jordartskarta (uttag 2014-10-30) i områden som är 5 000 år eller yngre i **A.** Norrbotten och **B.** Västerbotten. Ungefär 50 % av de undersökta lokalerna i områden som på jordartskartan redovisas som lera och silt, klassificerades i denna undersökning som sura sulfatjordar (fig. 31). Lera och silt i områden som är äldre än 5 000 år har en lägre ande sura sulfatjordar. I bilaga 4 redovisas andelen lera och silt yngre än 5 000 år i de två länens del- och huvudavrinningsområden.

under ett lager med torv. Inom denna studie har dock endast drygt tio våtmarker besökts, där grundvattenytan är opåverkad eller obetydligt påverkad av dikning. En orsak till att endast ett fåtal lokaler besökts, är att det varit svårt att identifiera områden med lera och silt som är opåverkade av diken. Ler- och siltjordar är de mest attraktiva jordarna för jordbruket i den undersökta regionen, vilket förklarar varför dessa jordar i så stor utsträckning är påverkade av dikning. I flera våtmarker har ett torvlager bildats ovanpå sulfidjorden. Dessa lager kan vara flera meter mäktiga. Nära kusten är dock dessa lager tunna eller saknas helt, eftersom våtmarkerna där är unga och torv inte hunnit ackumuleras i någon större utsträckning.

Vid fältarbetet i Västerbotten besöktes flera av de platser där det både finns historiska och nutida belägg för, att vattendragen påverkats av lågt pH som uppstår då sulfidhaltiga jordar dräneras (Wickström 1940). Även om jordarna i dessa områden fortfarande kan karaktäriseras som sura sulfatjordar är tillfällen med plötslig fiskdöd mindre vanliga, sannolikt eftersom det har förflutit flera årtionden sedan större dikningsprojekt utfördes. Tillfällen med fiskdöd förekommer dock, och ett torrare klimat kan tänkas leda till att perioder med låg grundvattenyta och påföljande sulfidoxidation blir vanligare (Erixon 2009).

Resultaten från analyser av metaller och andra grundämnen visar, att flera grundämnen förekommer i lägre halter i den oxiderade, sura sulfatjorden jämfört med i underliggande reducerande sediment (bilaga 3, figur 27 och 28). Detta indikerar att dessa grundämnen mobiliserats från de undersökta jordarna. Det är även tydligt att flera av de grundämnen som förekommer i lägre halter i de sura jordarna (fig. 27) tidvis förekommer i höga halter i de vattendrag som avvattnar områden med sura sulfatjordar. Exempelvis har Erixon (2009) visat att koncentrationerna av aluminium (Al), kadmium (Cd), kobolt (Co), koppar (Cu), mangan (Mn), nickel (Ni) och zink (Zn) i några vattendrag i Norrbotten, med hög andel sur sulfatjord i avrinningsområdet, periodvis är mycket höga. Data från SGUs biogeokemiska kartering visar att vissa att grundämnen som kobolt, nickel och koppar förekommer i relativt höga halter i bäckvattenväxter i områden där sura sulfatjordar förekommer (Lax 2005). Även studier från Finland visar att koncentrationerna av sällsynta jordartsmetaller (REE) tidvis är höga i vattendrag i områden med sura sulfatjordar (Åström 2001).

I jämförelse med flera spårämnen (t.ex. fig. 27) är Al och Mn (bilaga 3) dock inte lika tydligt utlakade från sura sulfatjordar. Det kan förklaras med att dessa grundämnen förekommer i relativt höga halter i jordarna, och därmed kan relativt stora mängder av dessa grundämnen mobiliseras utan att det signifikant påverkar halterna i jorden.

Orsaken till att många grundämnen läcker ut från sura sulfatjordar är främst en ökad vittring av silikatmineral förorsakad av jordarnas låga pH (Sohlenius & Öborn 2004), och i mindre utsträckning en effekt av att grundämnenen frigörs från oxiderade sulfidmineral. De låga pH-värden som uppmättes i de studerade profilerna visar att en omfattande vittring med all sannolikhet fortfarande pågår, vilket i sin tur gör att metaller fortsätter att mobiliseras från de sura sulfatjordarna. I övergångszonen mellan oxiderad och reducerad jord är halterna av lättrörliga grundämnen ofta relativt höga (fig. 27, bilaga 3). Om grundvattenytan permanent eller tillfälligt sänks kan därför flera för miljön skadliga grundämnen, mobiliseras och nå omgivande vattendrag.

Även om nydikning av skogs- och jordbruksmark inte är vanligt förekommande idag, finns det andra aktiviteter som kan leda till att sulfidhaltiga sediment syresätts. De sulfidhaltiga sedimenten förekommer ofta i områden som täcks av torv. Då ett sådant område dikas för att möjliggöra uppodling kompakteras de övre jordlagren och torven börjar oxidera bort. Detta leder till att befintliga diken måste fördjupas för att möjliggöra fortsatt odling, vilket sannolikt i sin tur leder till att djupare liggande lager med sulfidhaltiga sediment syresätts. Vid fältarbetet noterades exempel på nyligen utförda fördjupningar av diken (fig. 34). I både Norrbotten och Västerbotten finns flera torvtäkter och sökandet efter lämpliga torvmarker för etablering av nya torvtäkter pågår kontinuerligt. Eftersom torv i vissa områden underlagras av sulfidhaltiga sediment

är det viktigt att torven utvinns på ett sådant sätt att oxidation av underliggande sulfidjordar minimeras. Studier från Finland visar att det är möjligt att undvika att vattenkemin påverkas påtagligt genom att spara ett tunt lager torv som skyddar underliggande sulfidjord från att syresättas (Hadzic m.fl. 2014). Andra finska studier har däremot visat att torvtäkter som underlagras av bergarter med sulfidhaltiga mineral kan påverka vattenkemin påtagligt (Mäkelä 2013).

Byggnationer och muddring kan ge upphov till sulfidhaltiga jordmassor som, om de syresätts kan bli mycket sura. Vid fältarbetet påträffades vid en lokal muddermassor med pH 2,89 (fig. 35), vilket visar att sådana massor i vissa fall läggs upp och syresätts utan att åtgärder vidtas. Även om de jordvolymer som dessa aktiviteter ger upphov till är små, jämfört med de jordvolymer som syresätts i dikade områden, så kan de lokalt tänkas leda till en negativ påverkan på omgivande vatten. Dessutom är halterna av många metaller höga i de sediment som ackumulerar utanför områden med sura sulfatjordar (Nordmyr m.fl. 2007). Detta gör att det finns anledning att befara att relativt stora mängder metaller kan frigöras från syresatta muddermassor. Då det gäller hur sulfidhaltiga schaktmassor bör hanteras har Pousette (2007) tagit fram en handledning.

Hur kan påverkan från sura sulfatjordar minskas?

För att minska de negativa effekter som sura sulfatjordar har på miljön, krävs att sulfidhaltiga sediment inte dräneras så att de syresätts. Detta är speciellt viktigt i områden där vattnets kva-

Figur 34. Uppodlad torv som underlagras av sur sulfatjord i en dikad före detta våtmark ca 40 km söder om Skellefteå. Fördjupning av diken har utförds eftersom marken sjunker ihop då torven oxiderar och kompakteras. Det leder sannolikt till att djupare liggande lager med sulfidhaltiga sediment exponeras för syre. Den sura sulfatjord som underlagrar torven har, 90 cm under markytan, ett pH på 2,8.

Figur 35. Den pågående landhöjningen gör att hamnar och farleder grundas upp och måste muddras för att bibehålla sin funktion. De muddermassor som då uppstår utgörs ofta av sulfidhaltiga sediment. På bilden syns muddermassor vid Boviken ca fem kilometer norr om Skellefteå där ett pH-värde på 2,9 uppmättes.

litet redan har eller kan komma att påverkas negativt. Som nämnts tidigare pågår i Finland försök som syftar till att hålla grundvattenytans nivå uppe under torrperioder, för att minimera effekterna av sulfidoxidation (Uusi-Kämppä m.fl. 2013). Genom att höja grundvattenytan skulle det eventuellt vara möjligt att återetablera reducerande förhållanden i sura sulfatjordar. Eftersom stora andelar av de sura sulfatjordarna utgörs av produktiv jordbruksmark, är det dock viktigt att eventuella åtgärder inte får alltför stora ekonomiska konsekvenser.

Ett sätt att minska miljöpåverkan skulle kunna vara att vidta åtgärder på platser som tidigare utgjorts av åkermark, där grundvattenytan skulle kunna höjas utan att det får negativa ekonomiska konsekvenser.

Utifrån de resultat som redovisas i denna rapport är det möjligt att identifiera flera större områden där sura sulfatjordar förekommer. Jordartskartor, höjd över havet och Lantmäteriets höjdmodell kan även användas för att identifiera områden där det är sannolikt att dessa jordar förekommer, även om observerade förekomster saknas. De vattendrag som påverkats av sura sulfatjordar har i sina avrinningsområden en hög andel dikade finsediment belägna nära dagens havsytenivå (fig. 14, bilaga 1, Åberg 2013). Det finns följaktligen förutsättningar för att identifiera de områden med sura sulfatjordar som leder till att vatten i vissa sjöar och vattendrag påverkas negativt. Dessutom kan förhoppningsvis de resultat som redovisas här i framtiden användas tillsammans med resultat från pågående arbeten, som ett underlag för att avgöra var åtgärder för att minska sulfidoxidation kan vara aktuella.

FORTSATTA ARBETEN

För närvarande pågår vid SGU en sammanställning av data från Trafikverket och Tekniska kontoret i Luleå kommun som visar förekomsten av sulfidhaltiga sediment i Norrbotten och Västerbotten. Dessa data inkluderar resultat från analyser som företaget MRM i Luleå utfört, och som visar sulfidjordars potentiellt försurande förmåga. Data kommer att finnas tillgängliga vid SGU under våren 2015.

Under slutet av 2015 kommer ett masterarbete att färdigställas av Quynh Nga Nguyen på KTH. Syfte med arbetet är att genom modellering ta fram en riskarta som visar var i Norr-

botten sura sulfatjordar sannolikt förekommer. Inom det arbetet används data från detta projekt, tillsammans med andra data som visar var sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment kan förekomma.

På Åbo Akademi i Finland används GIS-analyser (*Artificial neural network* och *Fuzzy logic*) för att ringa in var sulfidjordar och sura sulfatjordar sannolikt förekommer (Beucher m.fl. 2013, Beucher m.fl. 2014). SGU planerar att utvärdera de metoder som används inom masterarbetet på KTH samt i Finland. Därefter väljs en metodik som används för ta fram kartor som visar var i Västerbotten och Norrbotten som sulfidjordar sannolikt förekommer, samt vilka vattendrag som riskerar att påverkas negativt. I det arbetet kommer även data som nu samlas in från externa aktörer att användas.

Även om det snart kommer att finnas en hel del data som visar var längst Norrlandskusten som sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment förekommer, finns det flera osäkerheter då det gäller dessa jordars utbredning och egenskaper. Det är framför allt önskvärt att fastställa i vilken utsträckning sura sulfatjordar förekommer i områden med lera och silt som är äldre än 5 000 år. På platser där de översta sedimenten varit syresatta under en lång tid, är det tänkbart att pH åter stigit, vilket gör att jordarna inte längre klassas som sura sulfatjordar. En möjlighet att dokumentera förekomster av tidigare sura sulfatjordar skulle kunna fastställas med ytterligare geokemisk karaktärisering. Eventuellt skulle bättre kunskap om före detta sura sulfatjordar kunna användas för att bedöma hur länge de sura jordar som finns idag kan påverka miljön.

På länsstyrelsen finns en hel del uppgifter om de dikesföretag som utförts i områden med sulfidjord. Inom detta projekt har vi inte gjort några analyser av den informationen. Genom att jämföra jordarnas egenskaper i områden med dikesföretag av olika ålder, skulle det eventuellt vara möjligt att fastslå hur länge den försurande effekten kvarstår efter det att grundvattenytan sänkts.

Det är väl känt att sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar även förekommer längre söderut i Sverige, t.ex. runt Mälaren (Öborn & Andersson 1999, Sohlenius & Öborn 2003). Inom ett examensarbete på Uppsala universitet har därför två studenter dokumenterat förekomster av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment i Uppsalatrakten (Bayard & Mood 2014). Inom det projektet används samma metodik som användes för att undersöka motsvarande jordar i Västerbotten och Norrbotten. Resultaten visar att sura sulfatjordar med liknade egenskaper som de i norra Sverige förekommer i det undersökta området. Samma metodik som nu använts i norra Sverige skulle kunna användas för att mer utförligt dokumentera sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment i Mälarregionen. En sådan dokumentation kan användas som ett underlag för att bedöma i vilken utsträckning mindre vattendrag i Mälarregionen är påverkade av sura sulfatjordar.

I denna rapport är utgångspunkten att områden med sura sulfatjordar kan påverka ytvattnet negativt. Det är dock möjligt att även grundvattnet kan påverkas negativt av dessa jordar. I både Västerbotten och Norrbotten finns grundvattenmagasin i nära anslutning till områden med sura sulfatjordar. Det är därför tänkbart att vattnets kvalitet i dessa grundvattenmagasin påverkats.

SLUTSATSER

Sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment har ofta tydliga kännetecken som gör att de kan identifieras i fält. De sulfidhaltiga sedimenten kännetecknas ofta av att de är helt eller delvis svartfärgade, medan de sura sulfatjordarna ofta kännetecknas av markanta rostbeklädda sprickor. I vissa fall saknar dock de sulfidhaltiga sedimenten den karaktäristiska svarta färgen.

Genom att mäta pH i fält och efter oxidation på laboratoriet är det möjligt att bedöma jordarnas befintliga pH samt jordarnas potentiellt försurande förmåga. Metoden kan därmed an-

vändas för översiktliga bedömningar av jordarnas nuvarande och potentiella miljöpåverkan. För att göra mer detaljerade riskbedömningar krävs dock mer data.

Geofysiska metoder kan användas tillsammans med resultat från karaktärisering i fält och resultat från pH-mätningar, för att relativt snabbt få en uppfattning om de sulfidhaltiga sedimentens utbredning inom större arealer samt på djupet.

Geokemisk karaktärisering av sura sulfatjordar och underlagrande sulfidjord visar att flera grundämnen lakats ut från de sura sulfatjordarna, sannolikt främst som en följd av jordarnas låga pH. Svavelhalt i reducerade, potentiellt försurande sediment är oftast hög (över 0,2 %) men det förekommer även försurande sediment med låga svavelhalter.

I Västerbotten och Norrbotten förekommer sura sulfatjordar främst i kustområden som på SGUs jordartskartor utgörs av lera och silt, och som genom landhöjningen torrlagts under de senaste 5 000 åren. Vattendrag med en stor andel av dessa jordar i sina avrinningsområden riskerar att periodvis påverkas negativt av lågt pH och höga metallkoncentrationer. Sura sulfatjordar har inte påträffats i områden som torrlagts för mer än 6 500 år sedan. Det kan dock inte uteslutas att dessa jordar lokalt förekommer i äldre områden, och det är också tänkbart att vissa vattendrag i områden som torrlagts för mer än 5 000 år sedan är påverkade av sura sulfatjordar.

Med utgångspunkt från resultaten av denna undersökning har den totala arealen sura sulfatjordar i områden yngre än 5 000 år, uppskattats till mins 600 km^2 i de två länen. Sannolikt är dock den totala arealen sura sulfatjordar större.

Sulfidhaltiga sediment förekommer främst i terrängens lägsta partier där grundvattenytan naturligt är belägen nära markytan. Sura sulfatjordar bildas då dessa sediment oxiderar, ofta till följd av att grundvattenytan sänkts genom dikning. De förekommer både i områden med skogs- och jordbruksmark. I områden med sulfidjord som inte påverkats av diken bildas inte sura sulfatjordar i samma utsträckning eftersom grundvattenytan i sådana områden står nära markytan. I denna undersökning har dock relativt få lokaler med sulfidjord som är opåverkade av diken kunnat dokumenteras.

De beräkningar av andelen lera och silt, yngre än 5 000 år, i avrinningsområdena som redovisas i denna rapport, kan användas för att bedöma om det är sannolikt att ett specifikt kustnära vattendrag påverkas negativt av sura sulfatjordar. Eftersom många våtmarker och sura sulfatjordar underlagras av potentiellt försurande sulfidhaltiga sediment, är det viktigt att förhindra att grundvattenytan i sådana områden sjunker så att jordarna syresätts. Detta är speciellt viktigt i avrinningsområden som har en hög andel lera och silt. Även om nydikning idag är ovanligt så kan effektivare täckdikning och fördjupning av befintliga diken leda till att sulfidjord exponeras för luft.

I många våtmarker underlagras torven i dikade före detta våtmarker av sulfidjord. Efter dikning sjunker torvlagren ihop, och oxiderar med tiden bort helt, vilket leder till att diken måste fördjupas varvid underliggande sulfidjord kan exponeras för luften. Dessutom kan sulfidjord exponeras för luft i samband med byggnationer och vid muddring av farleder. Muddermassor kan innehålla relativt höga halter av för miljön skadliga metaller och det är därför av speciellt stor vikt att inte dessa massor exponeras för luft.

Data som tagits fram inom detta projekt finns tillgängliga vid SGU, och visar lokaler där sulfidhaltiga jordar och sura sulfatjordar förekommer. Dessutom finns information om jordarnas pH, kolhalt och halter av ett stort antal grundämnen. Ytterligare data kommer successivt under 2015 att finnas tillgängliga.

TACK

Jan Åberg (Länsstyrelsen I Västerbotten) och Kristian Schoning (SGU) har läst tidigare versioner av texten och kommit med många värdefulla synpunkter. Johanna Wärnsberg och David Söderberg (båda studenter på Folkuniversitetet i Gävle) har producerat många av de kartor som

redovisas i rapporten. Gustaf Peterson (SGU) har beräknat andelen lera och silt i områden yngre än 5 000 år. Rebecca Litzell har granskat rapporten och kommit med många synpunkter som förbättrat texten. Hon har dessutom lagt ner ett stort arbete med att layouta figurer och kartor.

REFERENSER

Alhonen, P., Mantere-Alhonen, S. & Vuorinen, A., 1997: Preliminary observations on the metal content in some milk samples from an acid geoenvironment. *Bulletin of the Geological Society of Finland 69*, 31–41.

Andersson, M., 2012: Kompressionsegenskaper hos sulfidjordar. En fält- och laboratoriestudie av provbankar. Licentiatuppsats, Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser, Luleå tekniska universitet. 162 s.

Avenius, J., 2013: Sänkta sjöars inverkan på ytvatten i Västerbottens kustland. Samband mellan sänkningsnivåer och vattenkemi i sjöar på sulfidrika sedimentjordar. Examensarbete i naturgeografi. Umeå Universitet. 16 s.

Bayard, C. & Mood, L. K., 2014: Förekomsten av sura sulfatjordar i Mälardalen – en pilotstudie utförd åt SGU. Kandidatarbete vi Institutionen för geovetenskaper. Uppsala universitet. *Självständigt arbete Nr 92*. 74 s.

Beucher, A., Österholm, P., Martinkauppi, A., Edén, P. & Fröjdö, S., 2013: Artificial neural network for acid sulfate soil mapping: Application to the Sirppujoki River catchment area, southwestern Finland. *Journal of Geochemical Exploration 125*, 46–55.

Beucher, A., Fröjdö, S., Österholm, P., Martinkauppi, A., & Edén, P., 2014: Fuzzy logic for acid sulfate soilmapping: Application to the southern part of the Finnish coastal areas. *Geoderma 226–227*, 21–30.

Boman, A., Åström, m. & Fröjdö, S., 2008: Sulfur dynamic in boreal acid sulfate soils rich in metastable iron sulfide – The role of artificial drainage. Chemical Geology 255, 68–77.

Boman, A., Åström, m., Fröjdö, S. & Backlund K., 2010: Impact of isostatic land uplift and artificial drainage on oxidation of brackish-water sediments rich in metastable iron sulphide. *Geochimica et Cosmochimica Acta 74*, 1268–1281.

Byrsten, S. & Sandberg A., 2005: Metaller och fisk i Persöfjärden. Avd för kvalitets & miljöledning. Examensarbete 2005, Högskoleingenjörsprogrammet, Luleå tekniska universitet. 64 s.

Dent, D. L. & Pons, L. J., 1995: A world perspective on acid sulphate soils. *Geoderma 67*, 263–276.

Erixon, P., 2009: Klimatstyrda sulfidoxidationer som orsak till surhet och höga metallhalter i vattendrag i norra Sverige. Luleå: Luleå tekniska universitet (Forskningsrapport). 72 s.

Edelman, C.H., 1950: Soils of The Netherlands. North-Holland, Amsterdam.

Edén, P., Auri, J., Rankonen, E., Martinkauppi, A., Österholm, P., Beucher, A. & Yli-Halla, M. 2012a: Mapping acid sulfate soils in Finland — methods and results. *7th IASSC abstract*, Vaasa, Finland.

Edén, P., Rankonen, E., Auri, J., Yli-Halla, M., Österholm, P., Beucher, A. & Rosendahl, R., 2012b: Definition and classification of Finnish Acid Sulfate Soils. *7th IASSC abstract*, Vaasa, Finland.

Filppa, E., 2012: Identifiering av riskområden där sulfidsediment oxideras till följd av grundvattensänkning – Fallstudie av fem vattendrag vid Norrbottenskusten. *Länsstyrelsens rapportserie nr 11/2012*. Examensarbete i samarbete med Lunds universitet.61 s.

Fromm, E., 1965: Beskrivning till jordartskartan över Norbottens län nedanför lappmarksgränsen. *Sveriges geologiska undersökning Ca 39*, 236 s.

Fältmarsch, R., Åström, M. & Vuori K.-M., 2008: Environmental risks of metals mobilised from acid sulphate soils in Finland: a literature review. Boreal Environment research 13, 444–456.

Georgala, D. 1980: Paleoenvironmental studies of post-glacial black clays in north-eastern Sweden. Stockholm contributions in geology 36:2. Stockholms universitet. Ekenäs Tryckeri Aktiebolag.
Granlund, E., 1943: Beskrivning till jordartskarta över Västerbottens län nedanför odlingsgränsen. Sveriges geologiska undersökning Ca 26, 165 s.
Hadzic, M,. Postila, H., Österholm, P., Nystrand, m., Pahkakangas, S., Karppinen, A., Arola, M., Nilivaara-Koskela, R., Häkkilä, K., Saukkoriipi, J., Kunnas S. & Ihme, R., 2014: Sulfaattimailla syntyvän happaman kuormituksen ennakointi- ja hallintamenetelmät – SuHE-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 17/2014 (på finska med svensk sammanfattning). 88 s.
Ivarsson, H., Persson, A., Andersson, T. & Bergqvist, A., 1996: Sulfidjordar i norra och mellersta Sverige. Umeå universitet, Institutionen För ekologi och miljövård. 21 s.
Jerbo, A. 1965: Bottniska lersediment en geologisk–geoteknisk översikt. *Meddelande från statens järnvägars centralförvaltning geotekniska kontoret nr 11*, 159 s.
Landsbygdsnätverket, 2009: Sura sulfatjordar. Landsbygdsnätverkets publikation. 12 s.
Larsson, R., Westerberg, B., Albing, D., Knutsson, S. & Carlsson, E., 2007; Sulphide soil – geotechnical classification and undrained shear strength. *SGI Rapport 69*, 135 pp.
Lax, K. & Sohlenius, G., 2006: Sura sulfatjordar och metallbelastning. Sveriges geologiska undersökning. Rapport 2006:5, 19 s.
Lax, K., 2005: Stream plant chemistry as indictor of acid sulphate soils in Sweden. *Agricultural and Food Science 14*, 83–87.
Lintinen, P., Suppala, I., Vanhala, H. & Eklund, M., 2003: Survey of a buried ice-marginal deposit by airborne EM measurements – A case from Kyrönjoki valley plain in southern Osterbothnia, Finland. *Geological Survey of Finland, Special Paper 36*, 67–75.
Loke M. H., 2004: Rapid 2-D resistivity&IP inversion using the least-squares method. *Manual for Res2dinv*, version 3.71 (available at www.geotomo.com).
Müller, R., 2010: Embankments founded on sulphide clay – some aspects related to ground improvement by vertical drains. Licentiate Thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm. 47 s.
Myrstener, M., 2012: Konduktivitet i vattendrag som indikator på sura sulfatjordar. Examensarbete i geovetenskap/naturgeografi. Umeå universitet. 18 s.
Mäkelä, J., 2013: Pärnänsuo: characteristics of an organic agricultural land with an acid sulfate subsoil. Department of Food and Environmental Sciences. Helsingfors universitet. 67 s.
Nystrand, B.-Å. 1980: Some properties of sulphide-bearing sediments on the coast of northern Sweden. *Striae 13*, 52 pp.
Nordmyr, L., Åström, M. & Peltola P., 2008: Metal pollution of estuarine sediments caused by leaching of acid sulphate soils. Estuarine, *Coastal and Shelf Science 76*,141–152.
Palko, J., 1986: Mineral element content of timothy (*Phleum pratense L.*) in an acid sulphate soil area of Tupos village, northern Finland. *Acta Agriculturae Scandinavica 36*, 399–409.
Pousette, K., 2007: Råd och rekommendationer för hantering av sulfidjordsmassor. Luleå tekniska universitet. Institutionen för Samhällsbyggnad. Avdelningen för Geoteknologi. *Teknisk rapport 2007:13*, 38 s.
Påsse, T. & Andersson, L., 2005: Shore-level displacement in Fennoscandia calculated from empirical data, *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar, 127:4*, 253–268.
Saarinen T. S. & Kløve B., 2012: Past and future seasonal variation in pH and metal concentrations in runoff from river basins on acid sulphate soils in Western Finland. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous *Substances and Environmental Engineering, 47*, 1614–1625.

Sohlenius, G., 2011: Sulfidjordar och sura sulfatjordar – Vad gör SGU? Sveriges geologiska undersökning. S*GU-rapport 2011:12*.
Sohlenius, G. & Öborn I., 2003: Slutrapportering av projektet "Geokemisk karakterisering av sulfidhaltiga jordar" Sveriges geologiska undersökning. Slutrapport FoU projekt.
Sohlenius, G. & Öborn I., 2004: Geochemistry and partitioning of trace elements in acid sulphate soils in Sweden and Finland before and after sulphide oxidation. *Geoderma 122*, 167–175.
Sohlenius, G., Persson, L., Lax, K., Andersson, L. & Daniels, J., 2004: Förekomsten av sulfidhaltiga postglacial sediment. Slutrapport FoU projekt. Sveriges geologiska undersökning. *SGU-rapport 2004:9*.
Sohlenius. G., Persson, L. & Bastani, M., 2007: Geofysiska metoder för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. Sveriges geologiska undersökning. *SGU-rapport. 2007:31*.
Sundqvist, M., 2009: Kustmynnande vattendrag i Västerbottens län- Bedömning av naturvärde och påverkansgrad. *Länsstyrelsen i Västerbotten, meddelande 1-2009*. 29 s.
Sundström, R., Åström, M. & Österholm, P., 2002: Comparison of the metal content in acid sulphate soil runoff and industrial effluents in Finland. *Environmental Science & Technology 36*, 4269–4272.
Suppala, I., Lintinen, P. &och Vanhala, H., 2005: Geophysical characterisation of sulphide rich fine-grained sediments in Seinäjoki area, western Finland. *Geological Survey of Finland, Special Paper 38*, 61–71.
Toivonen J., Österholm, P. & Fröjdö, S., 2013: Hydrological processes behind annual and decadal-scale variations in the water quality of runoff in Finnish catchments with acid sulfate soils. *Journal of Hydrology 487*, 60–69
Uusi-Kämppä, J., Virtanen S., Rosendahl R., Österholm, P., Mäensivu M., Westberg, V., Regina, K., Ylivainio K., Yli-Halla M., Edén P. & Turtola., 2013: Minskning av miljörisker orsakade av sura sulfatjordar. Handbok för reglering av grundvattennivån. *MITT Rapport 89*. 24 s.
Wennman, Ö., 2000: Tidsmässig och rumslig variation i vattenkemi inom ett avrinningsområde påverkat av sulfidrika jordar. Examensarbete. Miljö- och hälsoskyddsprogrammet, Umeå universitet.
Westerberg, B. & Andersson, M., 2009: Undrained shear strength and compression properties of Swedish fine-grained sulphide soils. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,* Alexandria, pp 72–75
Wickström, L., 1939: Västerbotten 1939: *Västerbottens läns hembygdsförenings årsbok 20*. Nyheternas tryckeri Umeå. 260 s.
Wickström, L., 1940: Västerbotten 1940: *Västerbottens läns hembygdsförenings årsbok 21*. Nyheternas tryckeri Umeå. 200 s.
Åberg, J., 2013: Screening av sura sulfatjordar i Västerbotten. Inledande provtagning år 2013. Länsstyrelsen i Västerbotten. 28 s.
Åström, M., 2001: Abundance and fractionation patterns of rare earth elements in streams affected by acid sulphate soils. *Chemical Geology 175*, 249–258.
Åström, M., 2007: Inverkan av svenska och finländska sura sulfatjordar på metallhalter i bäckar. Sveriges geologiska undersökning. Slutrapport SGUs Dnr:60-1312/2004. 9 s.
Åström, m. & Björklund, A., 1995: Impact of acid sulfate soils on stream water geochemistry in western Finland. *Journal of Geochemical Exploration 55*, 163–170.
Öborn, I., 1994: Morphology, chemistry, mineralogy, and fertility of some acid sulfate soils in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences, 18, 46 pp.
Öborn, I. & Andersson, P., 1999: Sulfidlerornas betydelse för tungmetallflödena i vissa sedimentområden. Sveriges geologiska undersökning. Slutrapport Fou-projekt

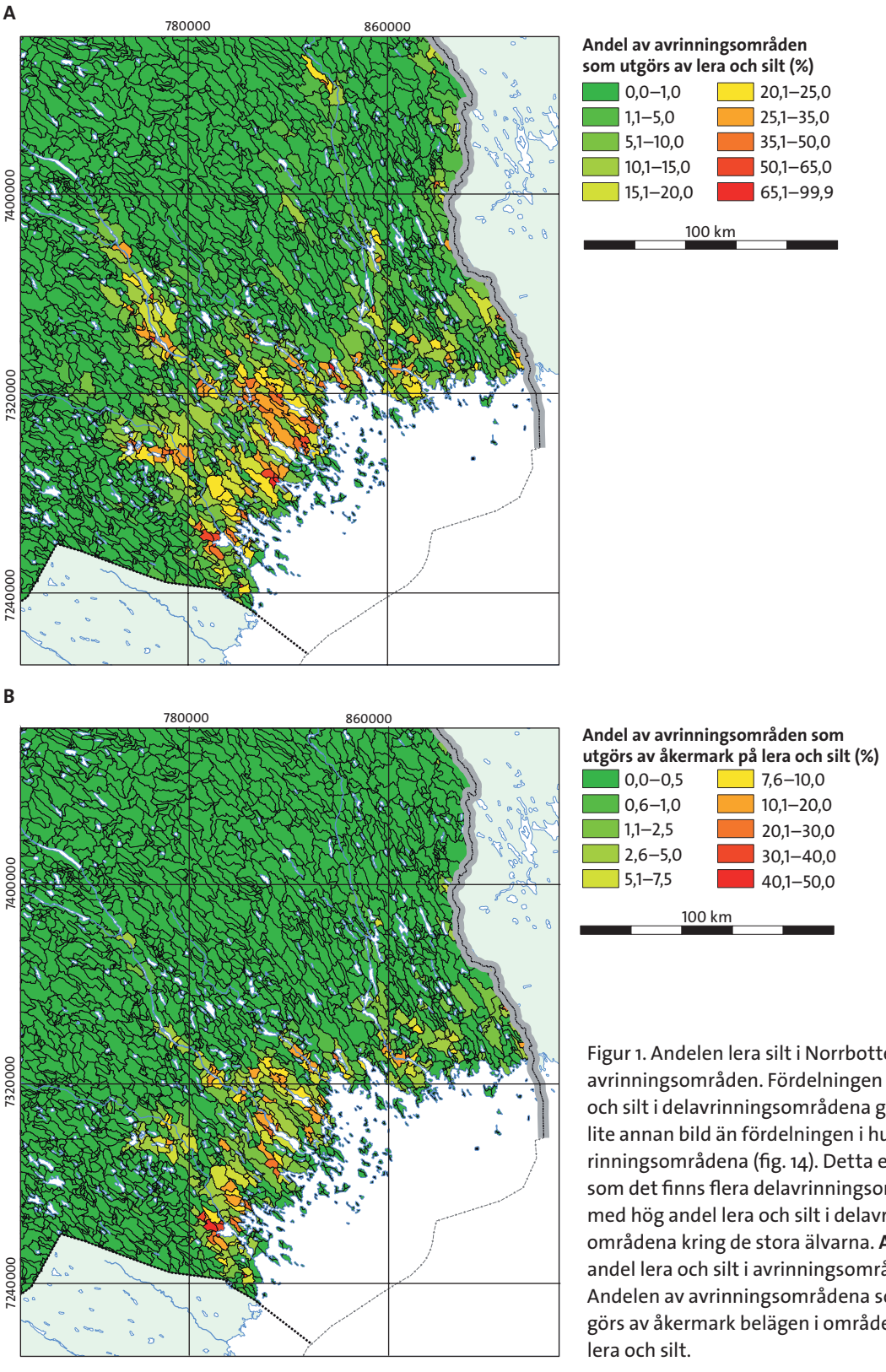
Öhlander, B., Forsberg, J., Nordblad, F. & Ingri, J., 2008: Sambanden mellan biogeokemisk kartering och vattenkvalitet, och användbarheten av biogeokemisk kartering för att identifiera områden med sulfidförande sediment. Sveriges geologiska undersökning. Slutrapport FoU-projekt, SGU-projekt nr 60-1200/2003. 27 s.

Öhlander, B., Nordblad, F., Lax, K., Frauke, E. & Ingri, J., 2013: Biogeochemical mapping of stream plants to trace acid sulphate soils: a comparison between water geochemistry and metal content in macrophytes. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. Österholm, P. & Åström, M., 2004: Quantification of current and future leaching of sulfur and metals from Boreal acid sulfate soils, western Finland. *Soil Research 42(6)*,) 547–551.

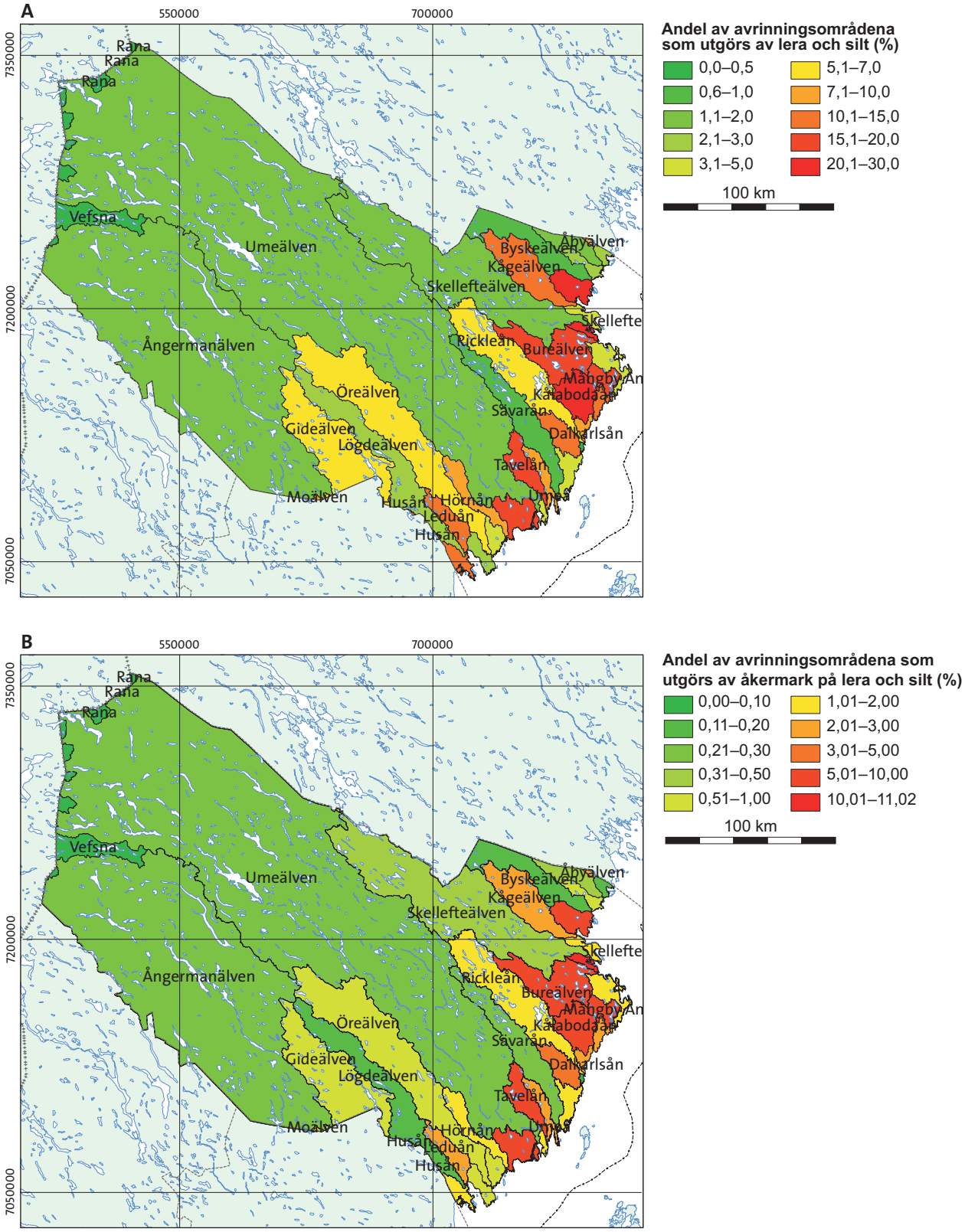
Österholm, P., Eden P., Martinkauppi, A., Beucher, A., Yli-Halla, M. & Jaakko, A., 2010: Mapping and characterization of boreal acid sulfate soils. 19th *World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010*, Brisbane, Australia.

BILAGA 1. ANDELEN LERA OCH SILT I AVRINNINGSOMRÅDEN

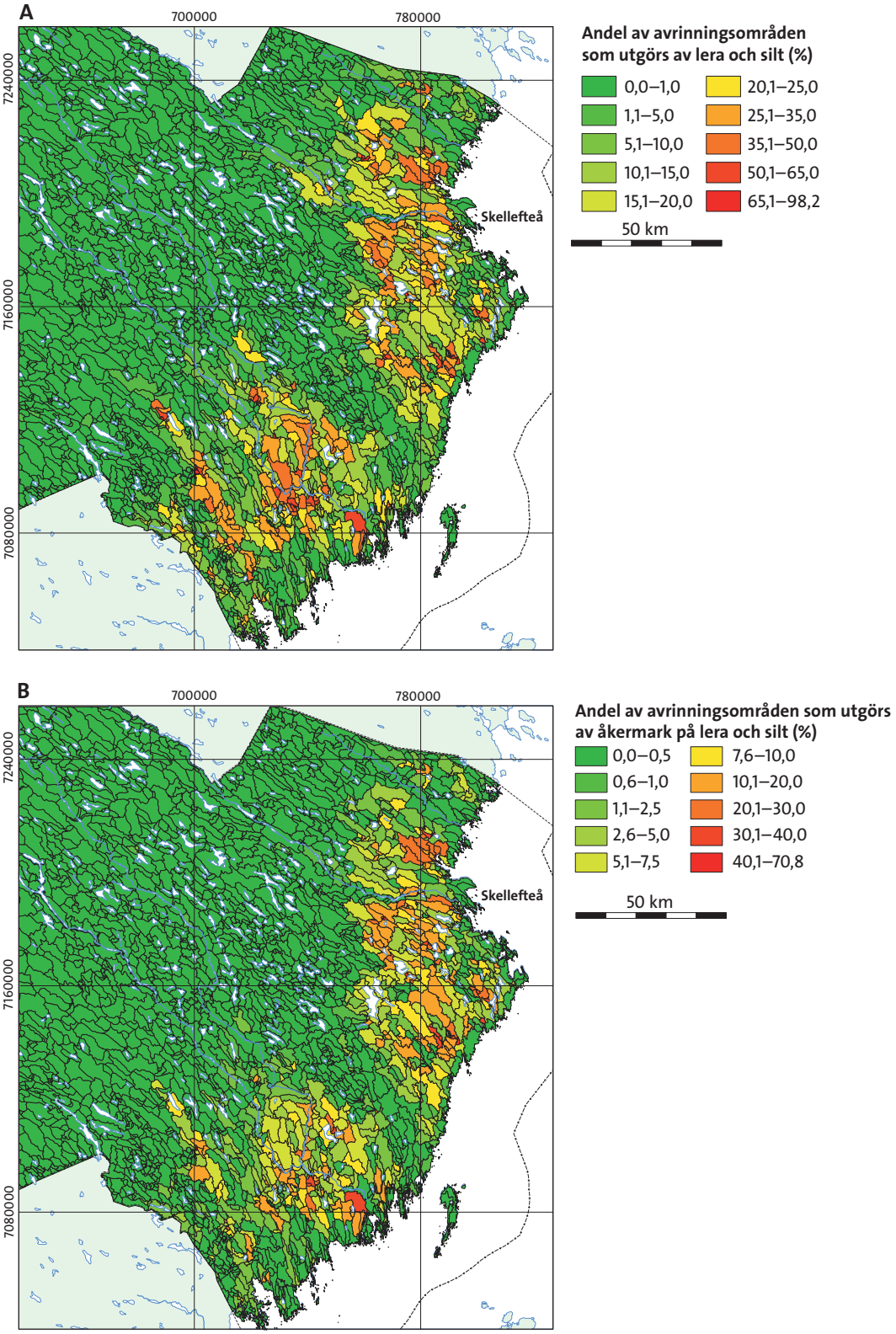
Kartorna i denna bilaga visar andelen lera och silt i huvud- och delavrinningsområdena i Västerbotten och Norrbotten. Dessutom finns kartor som redovisar andelen jordbruksmark på lera och silt i avrinningsområdena.



Figur 1. Andelen lera silt i Norrbottens delavrinningsområden. Fördelningen av lera och silt i delavrinningsområdena ger en lite annan bild än fördelningen i huvudavrinningsområdena (fig. 14). Detta eftersom det finns flera delavrinningsområden med hög andel lera och silt i delavrinningsområdena kring de stora älvarna. **A.** Total andel lera och silt i avrinningsområdena **B.** Andelen av avrinningsområdena som utgörs av åkermark belägen i områden med lera och silt.



Figur 2. Andelen lera och silt i Västerbottens huvudavrinningsområden. Det är tydligt att det är de mindre kustnära avrinningsområdena som har den största totala och uppodlade andelen lera och silt. De stora älvarna vars avrinningsområden sträcker sig upp mot fjällkedjan har en liten total andel lera och silt, även om dessa jordarter är vanligt förekommande i de kustnära delarna av älvarnas avrinningsområden. **A.** Total andel lera och silt i avrinningsområdena **B.** Andelen av avrinningsområdena som utgörs av åkermark belägen i områden med lera och silt.

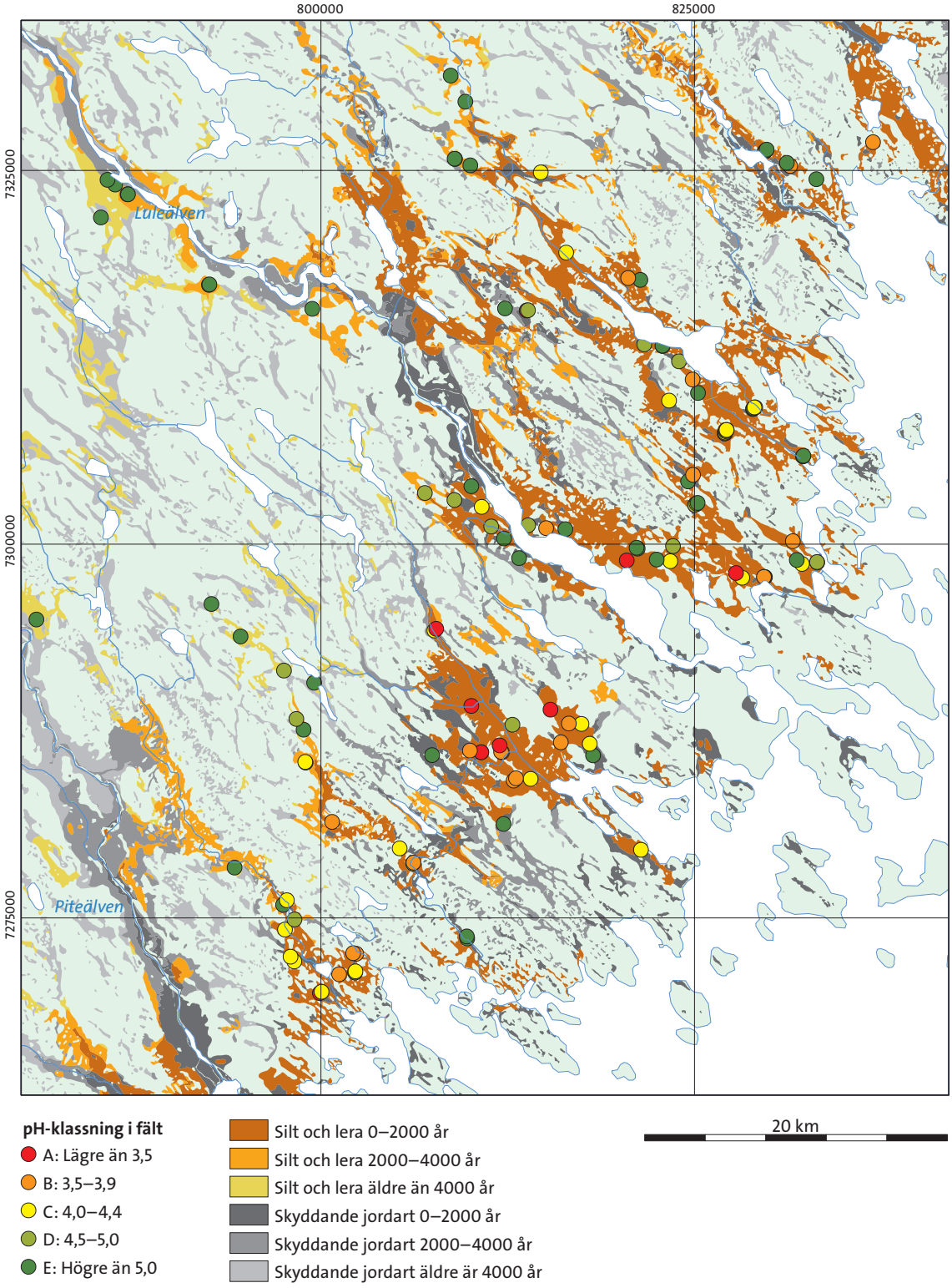


Figur 3. Andelen lera och silt i Västerbottens delavrinningsområden. Fördelningen av lera och silt i delavrinningsområdena ger en lite annan bild än fördelningen i huvudavrinningsområdena. Detta eftersom det finns flera delavrinningsområden med hög andel lera och silt i områdena kring de stora älvarna, vars huvudavrinningsområden karaktäriseras av en låg andel av dessa jordarter. **A.** Total andel lera och silt i avrinningsområdena **B.** Andelen av avrinningsområdena som utgörs av åkermark belägen i områden med lera och silt.

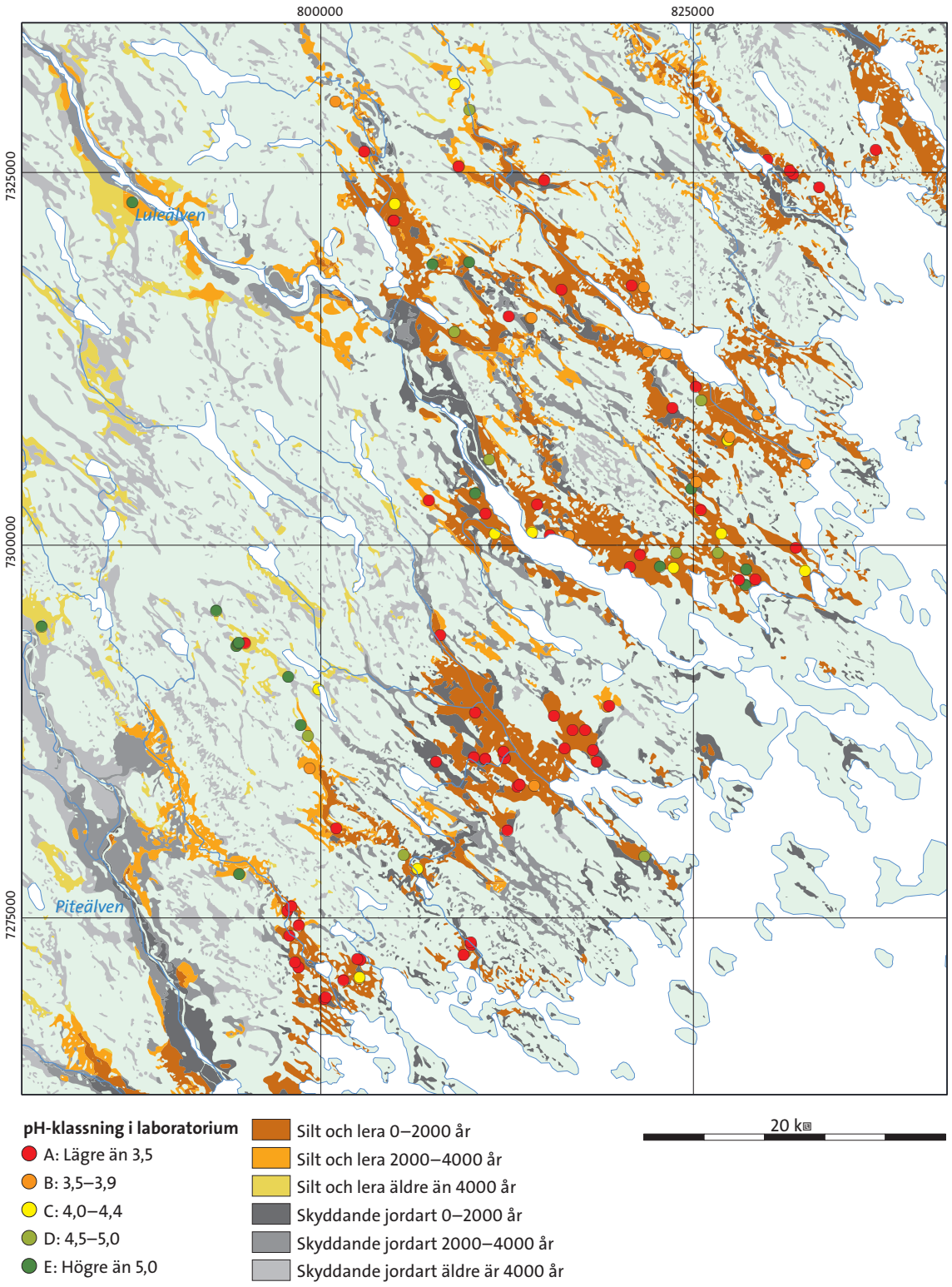
BILAGA 2. RESULTAT FRÅN pHMÄTNINGAR

Kartor som visar resultat från pH-mätningar i fält och efter oxidation.

Norrbotten

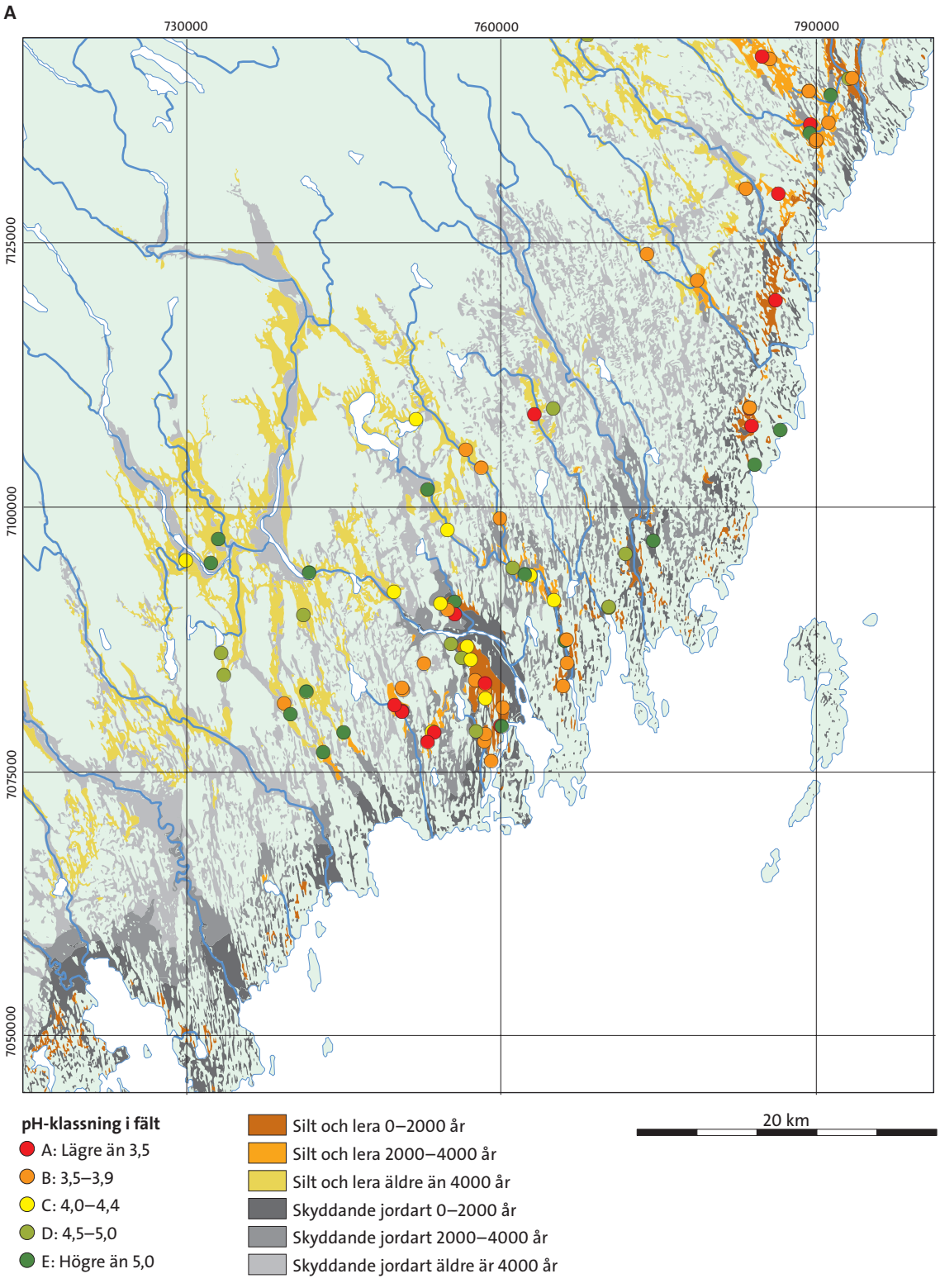


Figur 1. Resultat från de pH-mätningar i fält som utfördes i Norrbotten. De undersökta platser som har ett pH-värde under 4 klassificeras som sura sulfatjordar (klasserna A och B). Även lokaler med klass C kan klassas som sura sulfatjordar, om de underlagras av potentiellt sura sulfatjordar (se nedan). De flesta lokaler med sura sulfatjordar ligger i områden med silt eller lera som under de senaste årtusendena stigit ur havet. Mätvärdena är klassade enligt samma metod som GTK (Edén m.fl. 2012) använder.



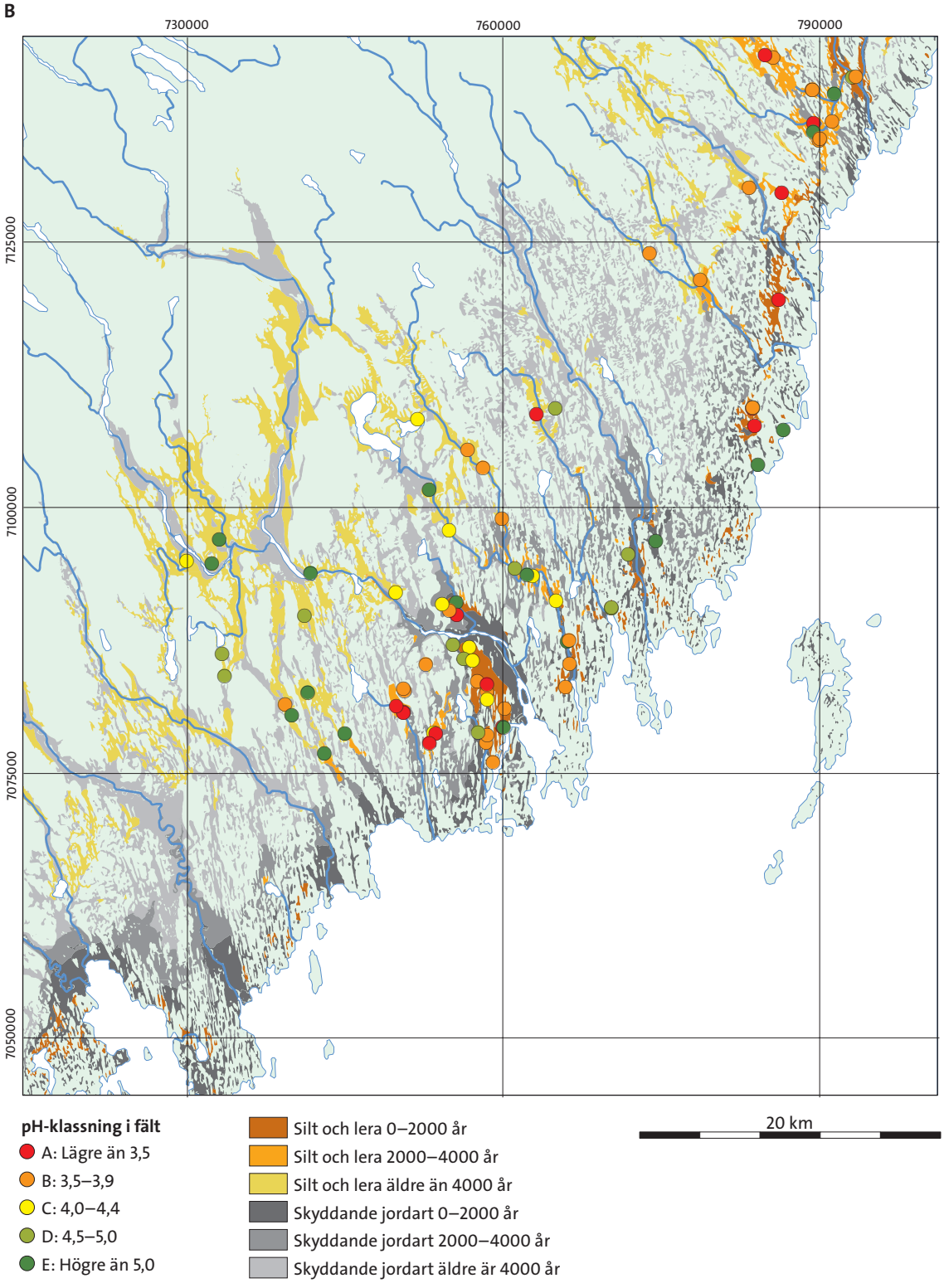
Figur 2. Resultat av pH-mätningar på prover från Norrbotten som fått oxidera i laboratorium. Många av dessa prover hade neutrala pH-värden i fält, men värdena har efter oxidation i labb sjunkit kraftigt som en effekt av att de sulfidmineral som ursprungligen fanns i proverna oxiderat. Klasserna A och B representerar prover vilka enligt GTKs nomenklatur (Edén m.fl. 2012) utgörs av potentiellt sura sulfatjordar (d.v.s. sulfidjordar). De flesta lokaler med potentiellt sura sulfatjordar ligger i områden med silt eller lera som under de senaste årtusendena stigit ur havet.

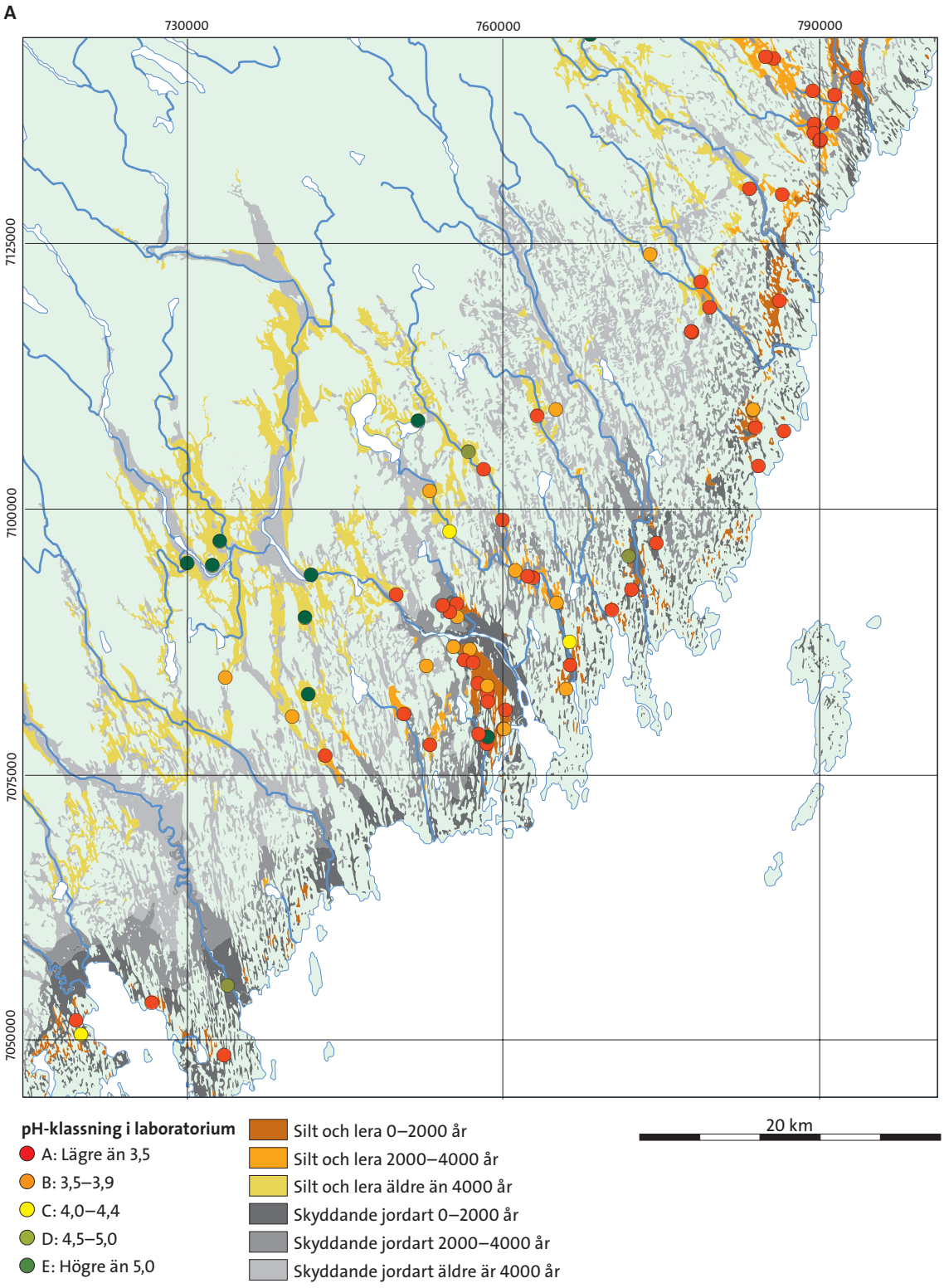
Västerbotten



Figur 3. De undersökta platser som har ett pH-värde under 4 klassificeras som sura sulfatjordar (klasserna A och B). Även lokaler med klass C kan klassas som sura sulfatjordar om de underlagras av potentiellt sura sulfatjordar (se nedan). De flesta lokaler med sura sulfatjordar ligger i områden med silt eller lera som under de senaste årtusendena stigit ur havet. Mätvärdena är klassade enligt samma metod som på GTK (Edén m.fl.. 2012). **A.** Resultat från de pH mätningar i fält som utfördes i den södra delen av Västerbottens kustområden och **B.** Resultat från de pH mätningar i fält som utfördes i den norra delen av Västerbottens kustområden.

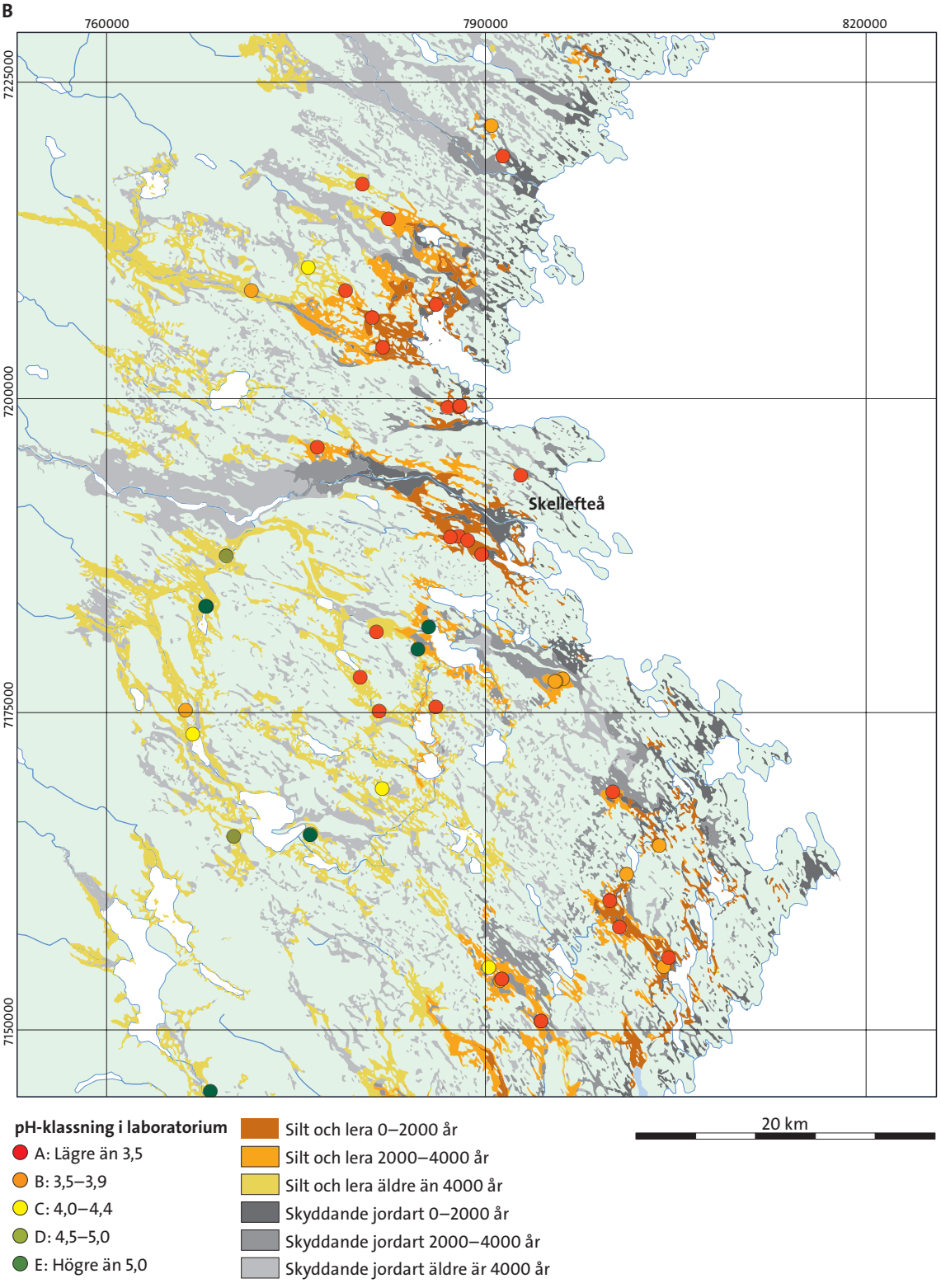
B


730000
760000
790000
7125000
7100000
7075000
7050000
pH-klassning i fält
A: Lägre än 3,5
B: 3,5–3,9
C: 4,0–4,4
D: 4,5–5,0
E: Högre än 5,0
Silt och lera 0–2000 år
Silt och lera 2000–4000 år
Silt och lera äldre än 4000 år
Skyddande jordart 0–2000 år
Skyddande jordart 2000–4000 år
Skyddande jordart äldre är 4000 år
20 km



Figur 4. De flesta av dessa prover hade neutrala pH-värden i fält, men värdena har efter oxidation i labb sjunkit kraftigt som en effekt av att de sulfidmineral som ursprungligen fanns i proverna oxiderat. Klasserna A och B representerar prover vilka enligt GTKs nomenklatur (Edén m.fl. 2012) utgörs av potentiellt sura sulfatjordar (d.v.s. sulfidjordar). De flesta lokaler med potentiellt sura sulfatjordar ligger i områden med silt eller lera som under de senaste årtusendena stigit ur havet. **A.** Resultat av pH mätningar på prover som fått oxidera i labb. Proverna kommer från södra delen av Västerbotten och **B.** Resultat av pH mätningar på prover som fått oxidera i labb. Proverna kommer från norra delen av Västerbotten.

B



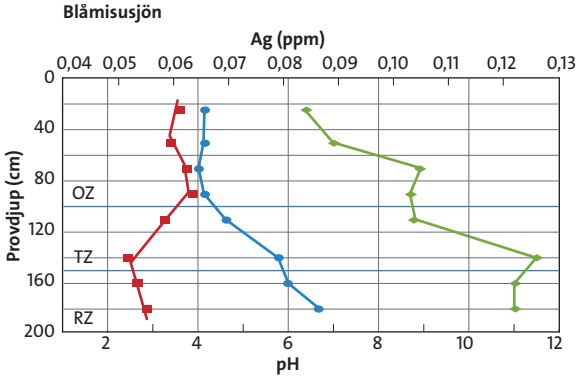
pH-klassning i laboratorium

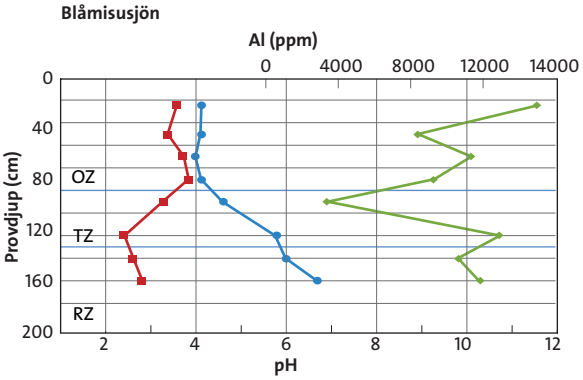
- A: Lägre än 3,5
- B: 3,5–3,9
- C: 4,0–4,4
- D: 4,5–5,0
- E: Högre än 5,0

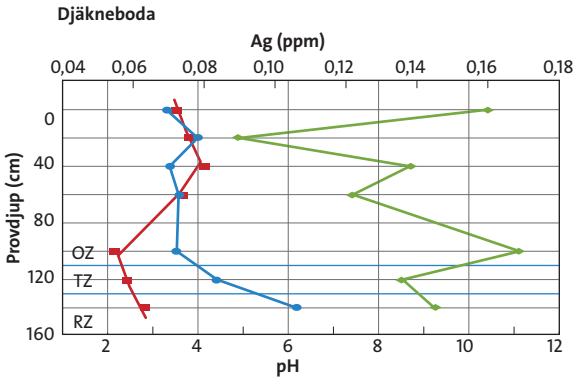
- Silt och lera 0–2000 år
- Silt och lera 2000–4000 år
- Silt och lera äldre än 4000 år
- Skyddande jordart 0–2000 år
- Skyddande jordart 2000–4000 år
- Skyddande jordart äldre är 4000 år

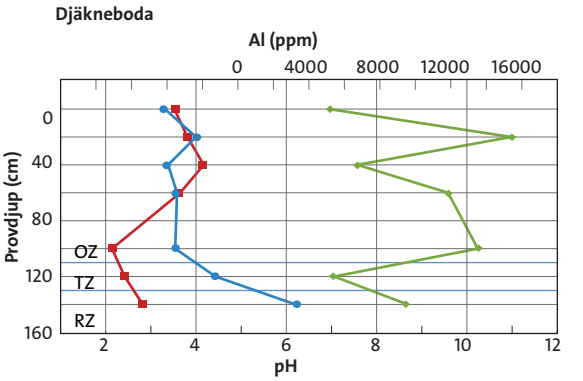
BILAGA 3. HALTER AV GRUNDÄMNEN OCH pH

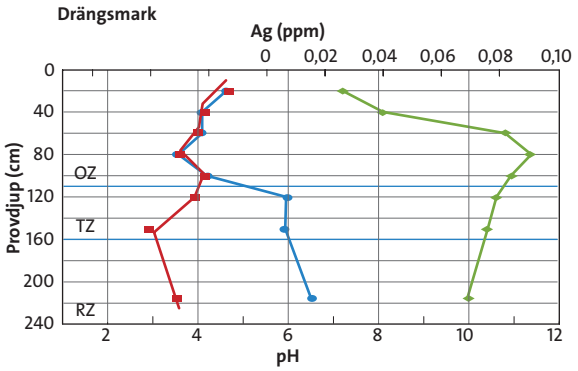
Förändring av silver (Ag), aluminium (Al), arsenik (As), kadmium (Cd), kobolt (Co), krom (Cr), koppar (Cu), järn (Fe), mangan (Mn), magnesium (Mg), nickel (Ni) och zink (Zn) mot djup under markytan på lokalerna Blåmissusjön, Djäkneboda, Drängsmark och Granån. Läget för lokalerna anges i figur 10. Halterna för de olika grundämnena redovisas i ppm (milligram per kilo) och symboliseras med gröna linjer, Dessutom visas pH uppmätt i fält (blåa linjer) och pH uppmätt efter det att proverna exponerats för luft i laboratorium (röda linjer). Alla fyra lokaler utgörs av sur sulfatjord (i diagrammen OZ) som underlagras av en övergångszon (TZ) som i sin tur underlagras av reducerade sulfidhaltiga sediment (RZ). Den överst liggande sura sulfatjorden kännetecknas av ett lågt pH medan övergångszonen karakteriseras av mot djupet stigande pH som övergår i sulfidhaltiga sediment med neutralt pH. Efter det att de sulfidhaltiga sedimenten exponerats för luft är dock pH betydligt lägre. Många element (t.ex. kadmium och nickel) har mobiliserats från den sura sulfatjorden vilket är en effekt av att de sura förhållandena orsakar en intensiv vittring.

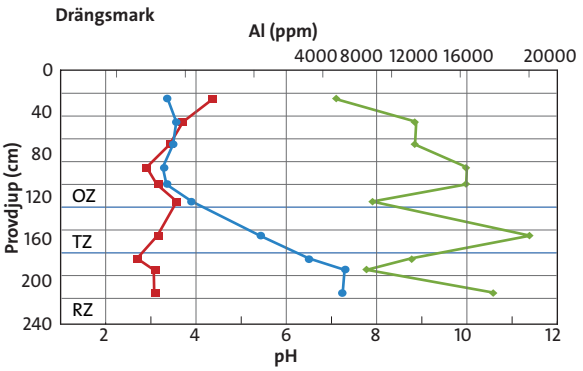

Blåmisusjön
Ag (ppm)
0,04 0,05 0,06 0,07 0,08 0,09 0,10 0,11 0,12 0,13
Provdjup (cm)
0
40
80
120
160
200
OZ
TZ
RZ
2 4 6 8 10 12
pH

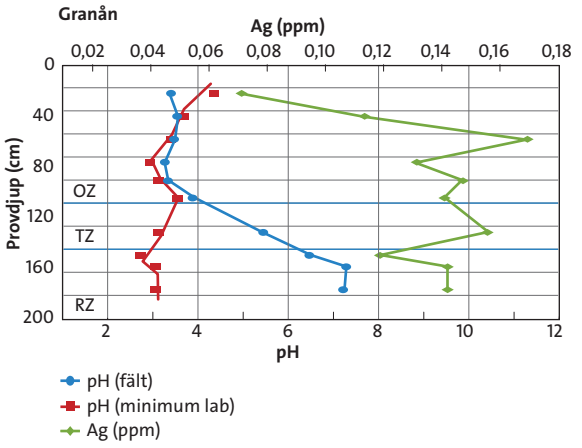

Blåmisusjön
Al (ppm)
0 4000 8000 12000 14000
Provdjup (cm)
0
40
80
120
160
200
OZ
TZ
RZ
2 4 6 8 10 12
pH

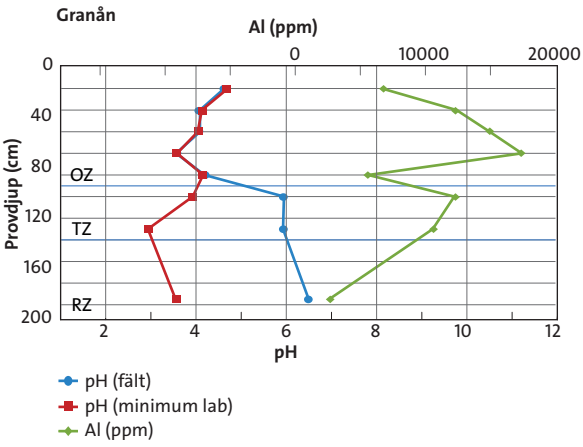

Djäkneboda
Ag (ppm)
0,04 0,06 0,08 0,10 0,12 0,14 0,16 0,18
Provdjup (cm)
0
40
80
120
160
OZ
TZ
RZ
2 4 6 8 10 12
pH

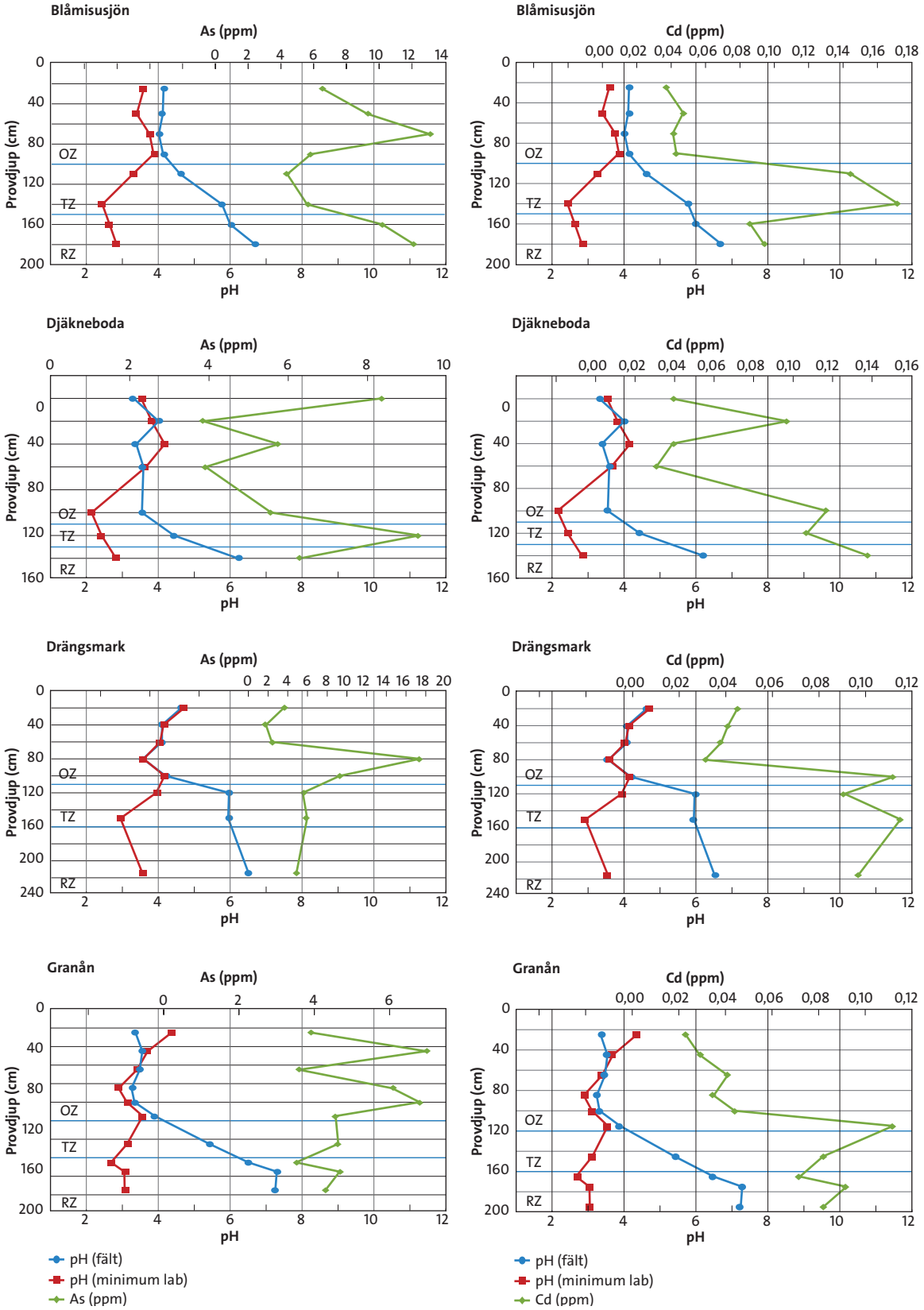

Djäkneboda
Al (ppm)
0 4000 8000 12000 16000
Provdjup (cm)
0
40
80
120
160
OZ
TZ
RZ
2 4 6 8 10 12
pH

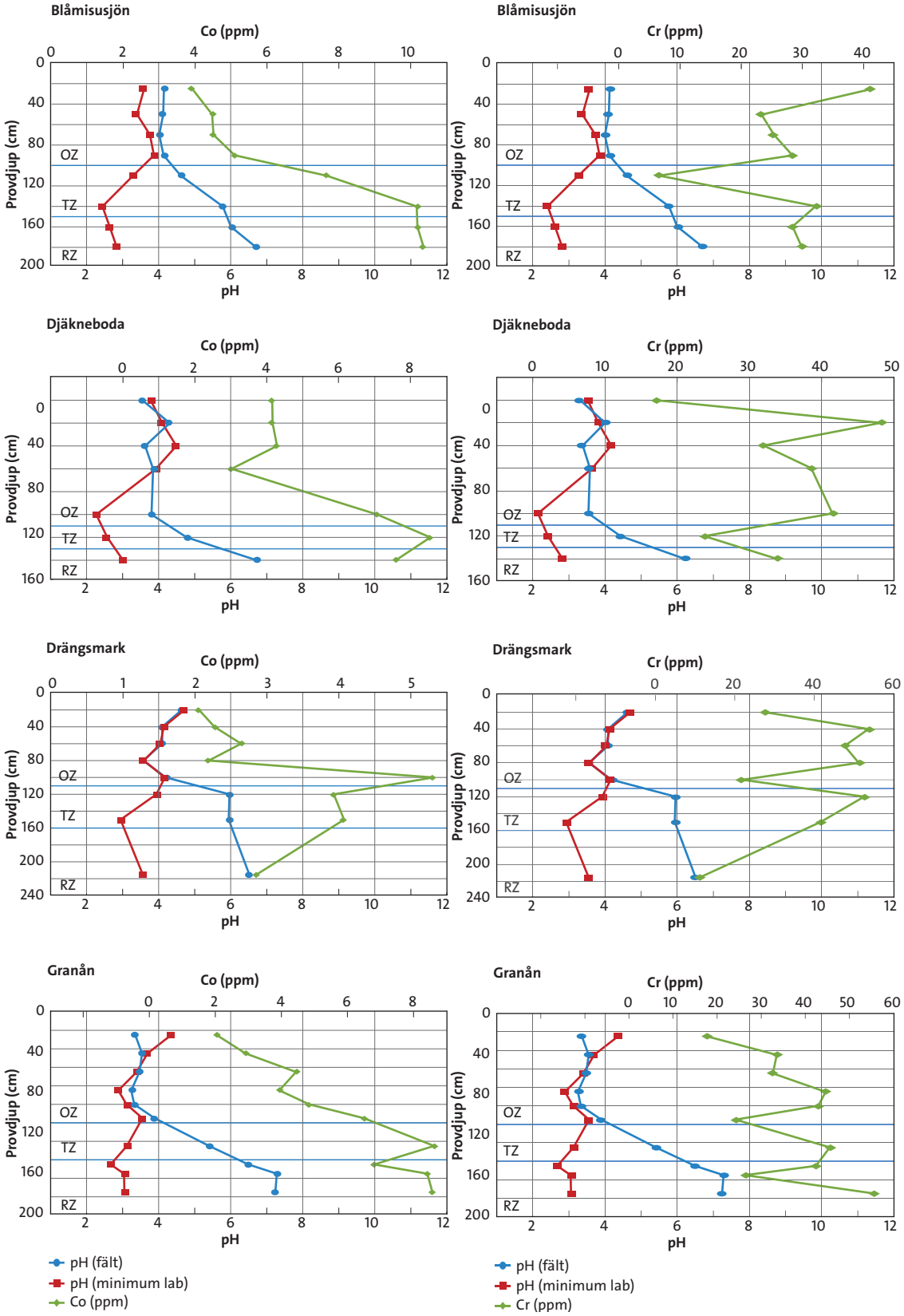

Drängsmark
Ag (ppm)
0 0,02 0,04 0,06 0,08 0,10
Provdjup (cm)
0
40
80
120
160
200
240
OZ
TZ
RZ
2 4 6 8 10 12
pH

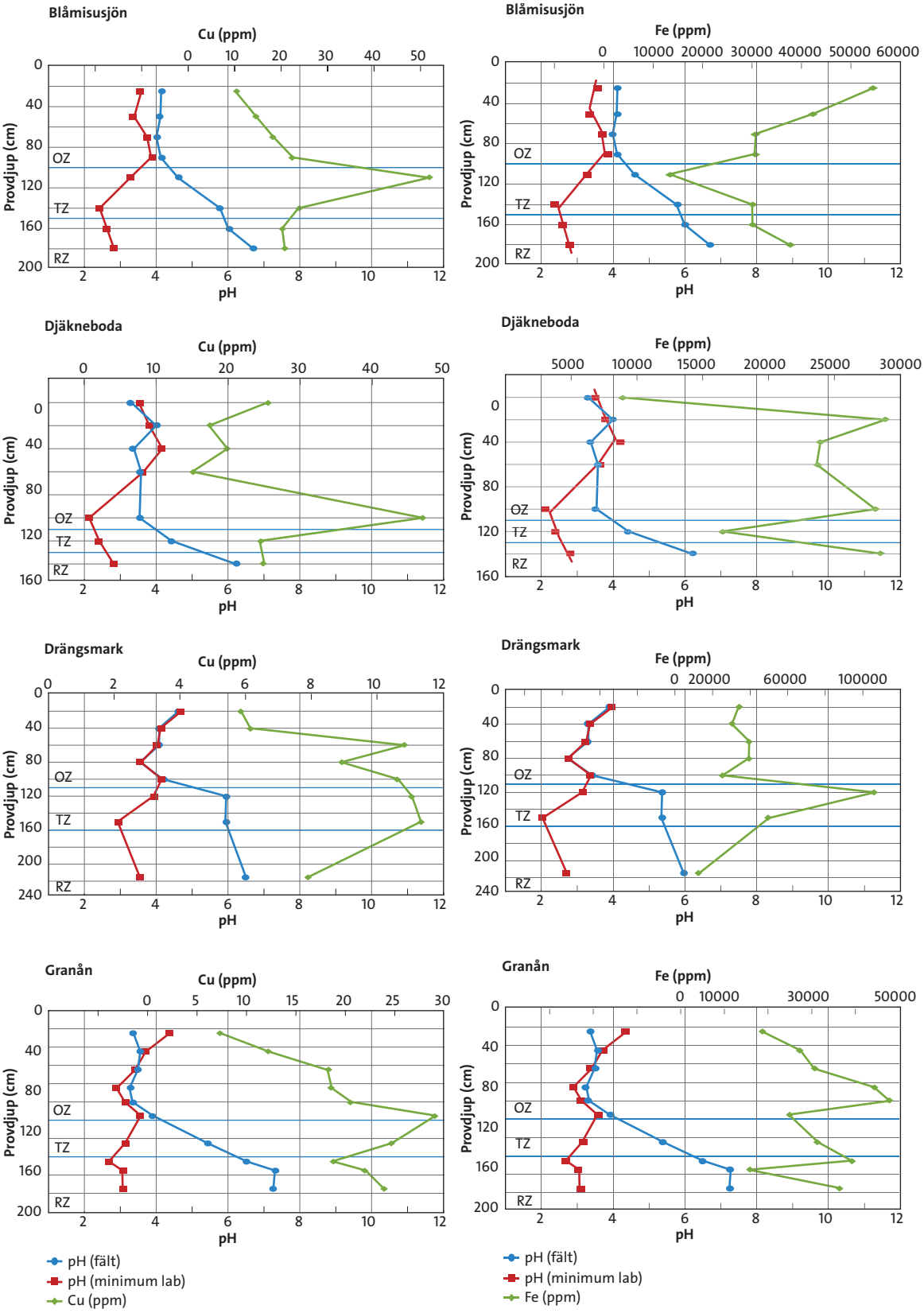

Drängsmark
Al (ppm)
4000 8000 12000 16000 20000
Provdjup (cm)
0
40
80
120
160
200
240
OZ
TZ
RZ
2 4 6 8 10 12
pH

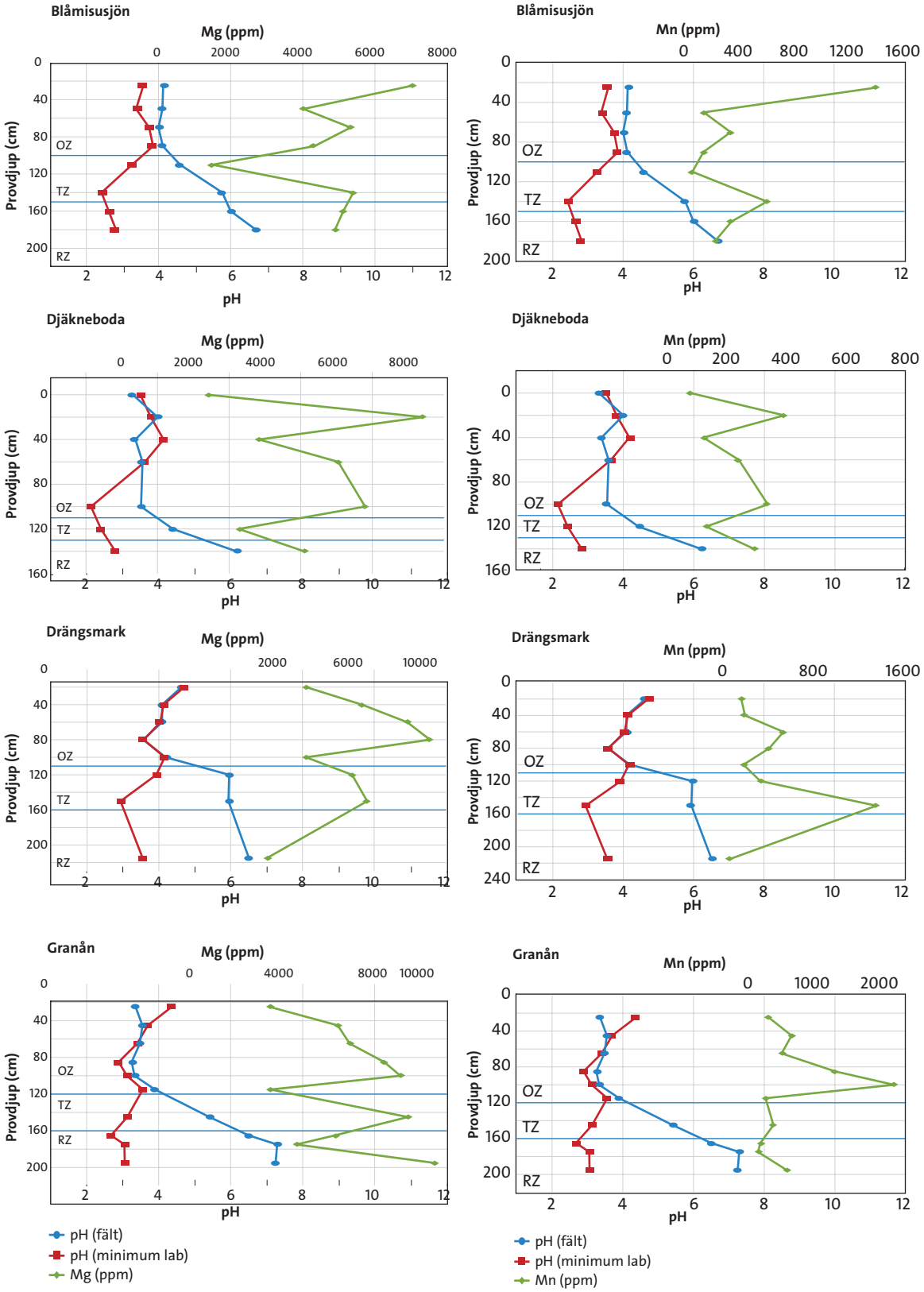

Granån
Ag (ppm)
0,02 0,04 0,06 0,08 0,10 0,12 0,14 0,16 0,18
Provdjup (cm)
0
40
80
120
160
200
OZ
TZ
RZ
2 4 6 8 10 12
pH
pH (fält)
pH (minimum lab)
Ag (ppm)

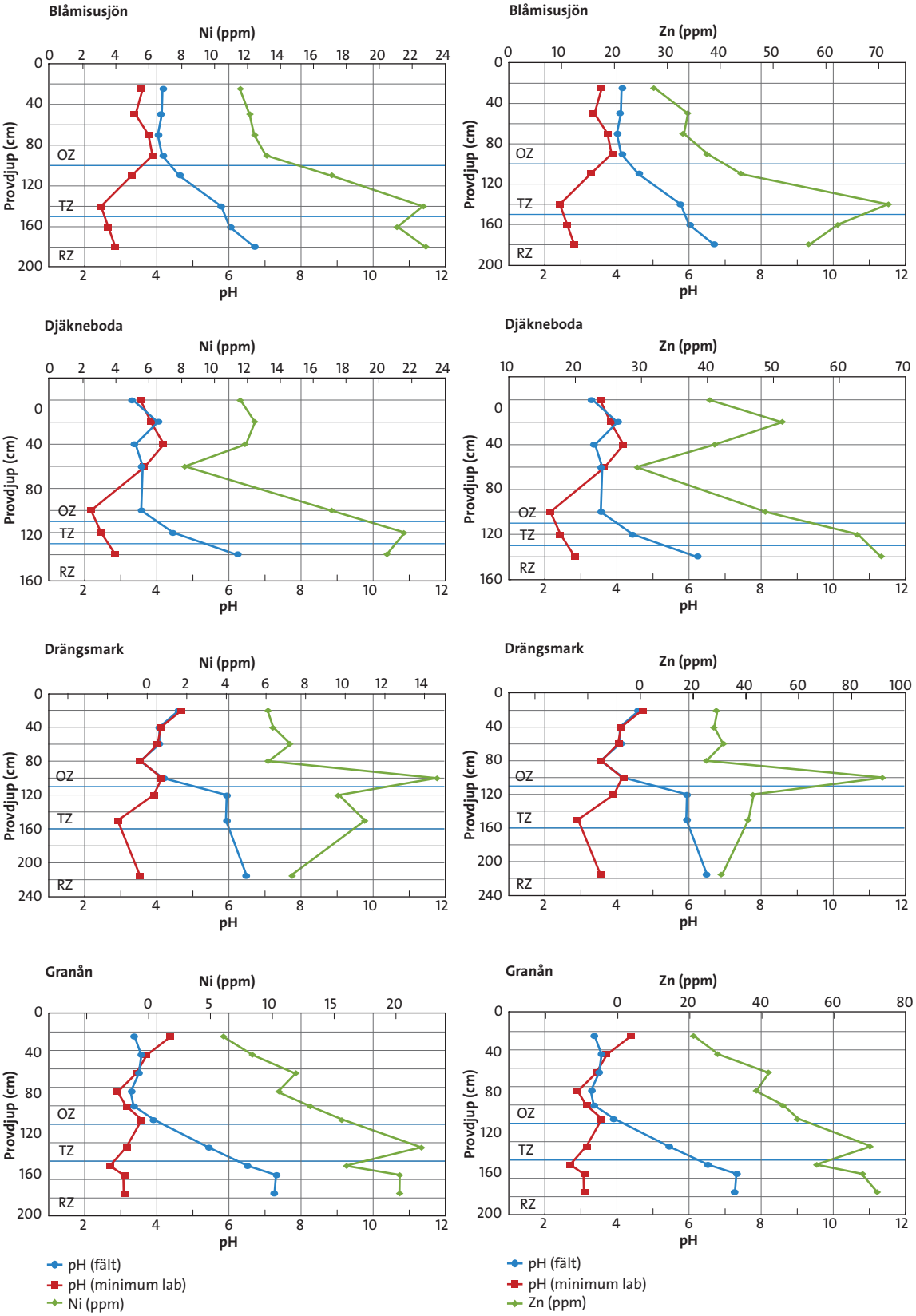

Granån
Al (ppm)
0 10000 20000
Provdjup (cm)
0
40
80
120
160
200
OZ
TZ
RZ
2 4 6 8 10 12
pH
pH (fält)
pH (minimum lab)
Al (ppm)


Blåmisusjön
As (ppm)
Cd (ppm)
Djäkneboda
Drängsmark
Granån
Provdjup (cm)
pH
OZ
TZ
RZ
pH (fält)
pH (minimum lab)
As (ppm)
Cd (ppm)


Blåmisusjön
Co (ppm)
Cr (ppm)
Djäkneboda
Drängsmark
Granån
Provdjup (cm)
pH
OZ
TZ
RZ
pH (fält)
pH (minimum lab)
Co (ppm)
Cr (ppm)

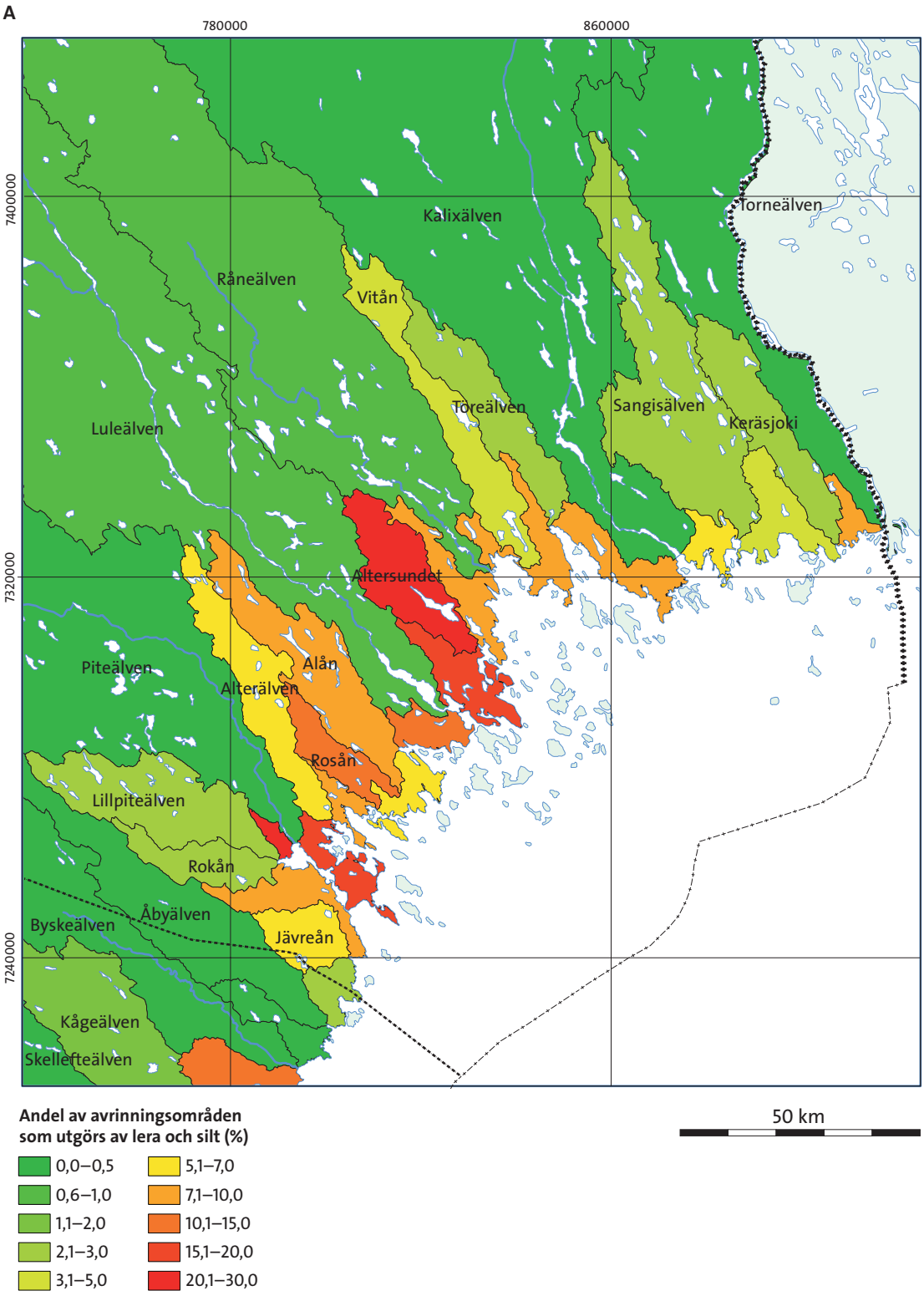

Blåmisusjön
Cu (ppm)
Provdjup (cm)
pH
OZ
TZ
RZ
Blåmisusjön
Fe (ppm)
Djäkneboda
Djäkneboda
Drängsmark
Drängsmark
Granån
Granån
pH (fält)
pH (minimum lab)
Cu (ppm)
Fe (ppm)


Blåmisusjön
Mg (ppm)
Provdjup (cm)
OZ
TZ
RZ
pH
Blåmisusjön
Mn (ppm)
Djäkneboda
Djäkneboda
Drängsmark
Drängsmark
Granån
Granån
pH (fält)
pH (minimum lab)
Mg (ppm)
Mn (ppm)


Blåmisusjön
Ni (ppm)
Zn (ppm)
Djäkneboda
Drängsmark
Granån
Provdjup (cm)
pH
OZ
TZ
RZ
pH (fält)
pH (minimum lab)
Ni (ppm)
Zn (ppm)

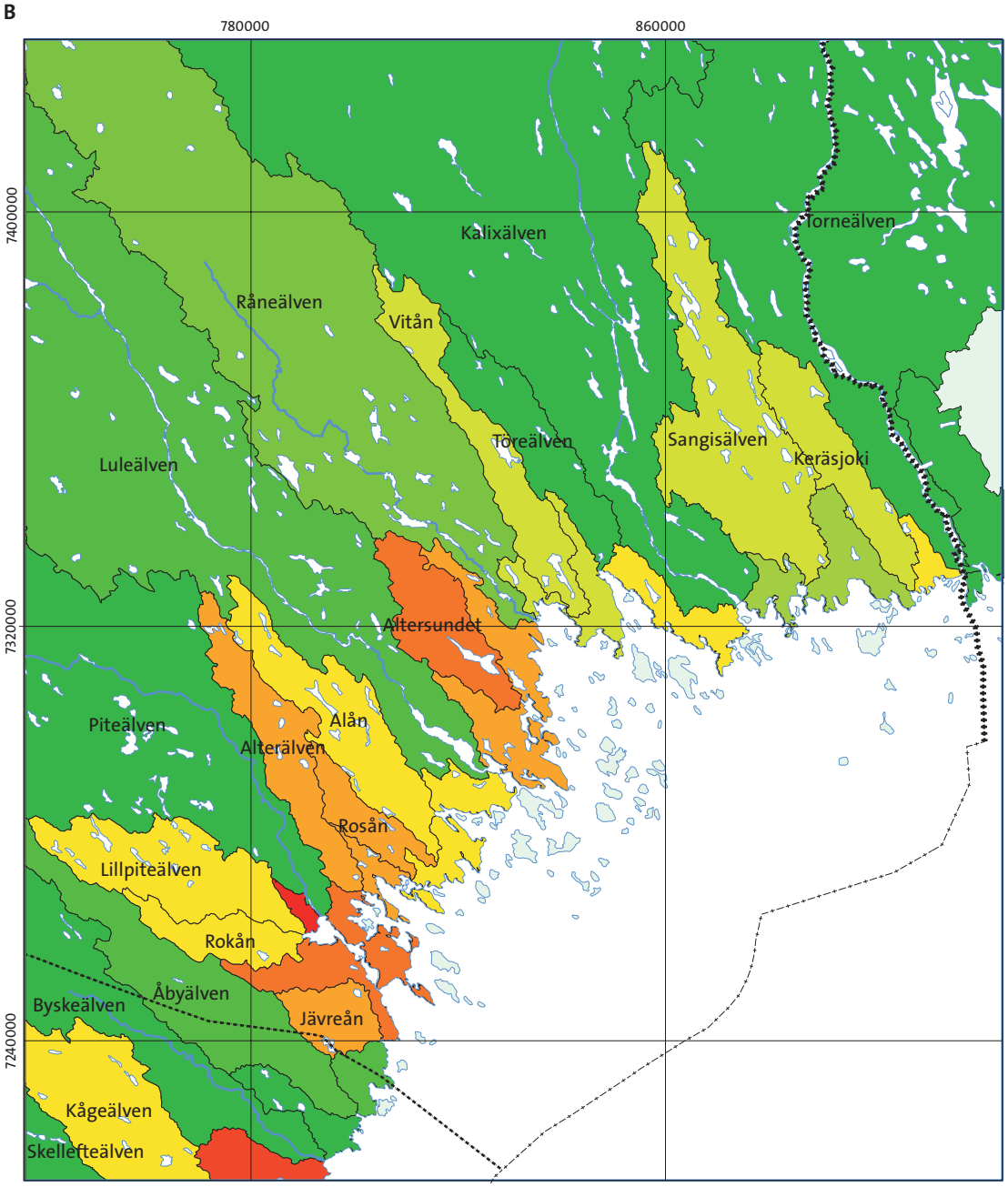
BILAGA 4. KARTOR ÖVER ANDEL LERA OCH SILT

Kartorna i denna bilaga visar andelen lera och silt i områden i Västerbotten och Norrbotten som under de senaste 5 000 åren torrlagts genom landhöjningen. Kartorna visa dels andelen lera och silt i huvud- och delavrinningsområdena och dels andelen jordbruksmark på lera och silt i avrinningsområdena. Kartorna i denna bilaga kan jämföras med de kartor som redovisas i bilaga 1, vilka redovisar den totala andelen lera och silt i avrinningsområdena. Resultaten visar att sura sulfatjordar främst förekommer i områden som torrlagts under de senaste 5 000 åren, och de kartor som visas i denna bilaga kan därför användas för att identifiera vattendrag där det finns risk att vattnets kvalitet påverkats negativt. I framförallt Västerbotten finns stora områden med lera och silt i områden som är äldre en 5 000 år, vilket framgår vid en jämförelse mellan kartorna i bilaga 1 och bilaga 4.



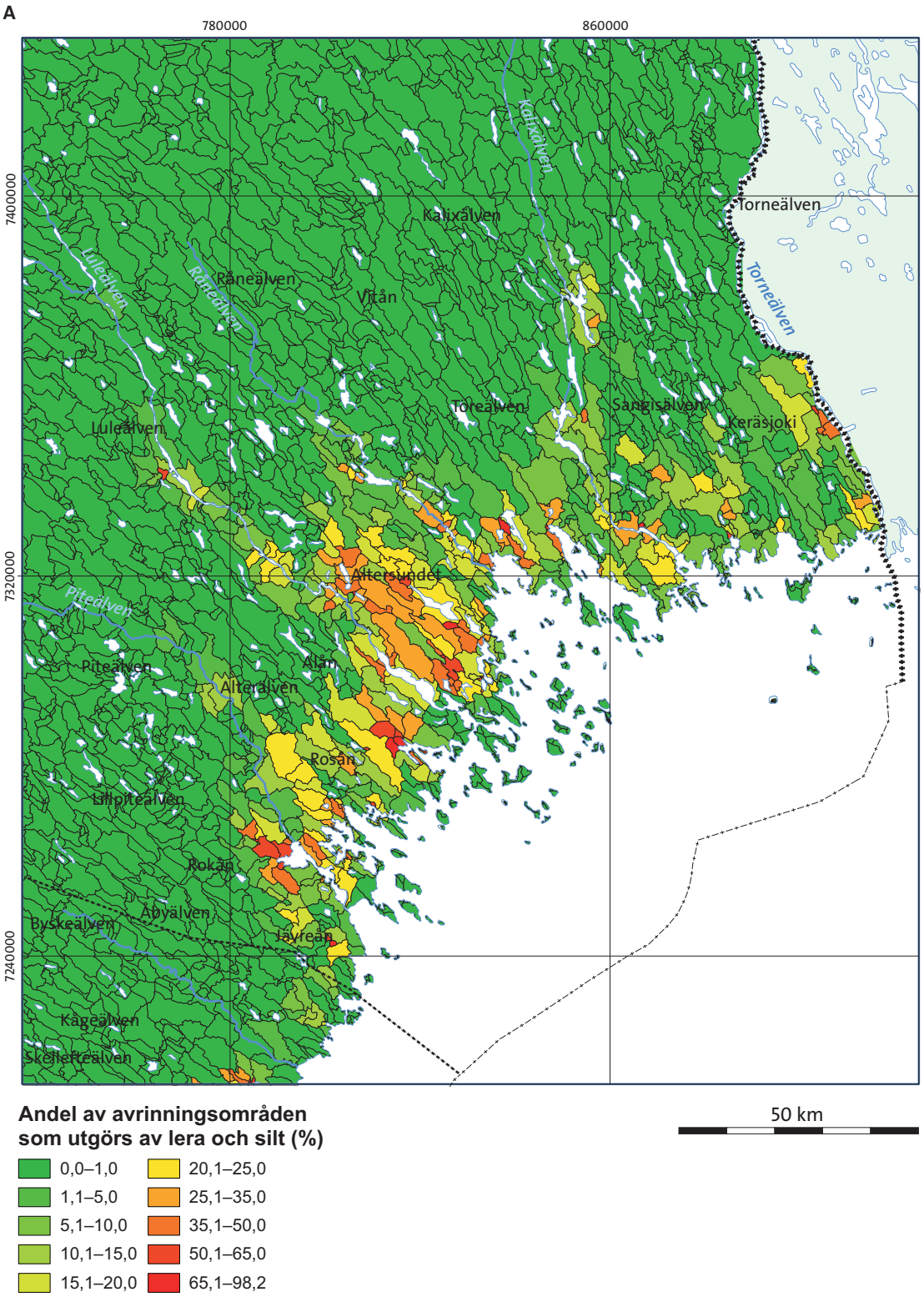
Figur 1. Andelen lera och silt, i områden yngre än 5 000 år, i Norrbottens huvudavrinningsområden. Det är tydligt att det är de mindre, kustnära avrinningsområdena som har den största totala och uppodlade andelen lera och silt. **A.** Total andel lera och silt i avrinningsområdena. **B.** Andelen av avrinningsområdena som utgörs av åkermark belägen i områden med lera och silt.

B



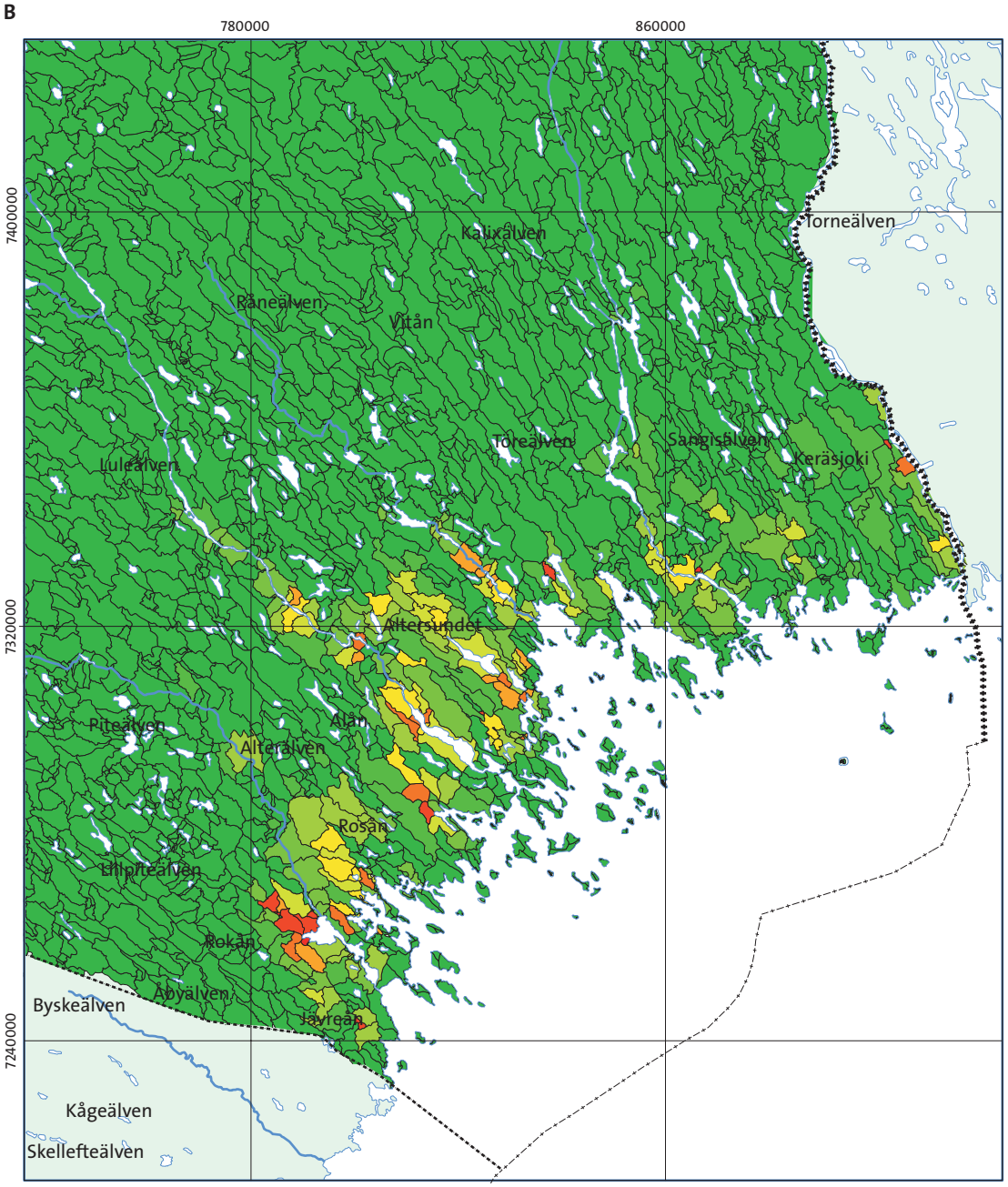
Andel av avrinningsområden som utgörs av jordbruksmark i områden med lera och silt (%)

0,0–0,1	1,1–2,0
0,2	2,1–3,0
0,3	3,1–5,0
0,4–0,5	5,1–10,0
0,6–1,0	10,1–18,0



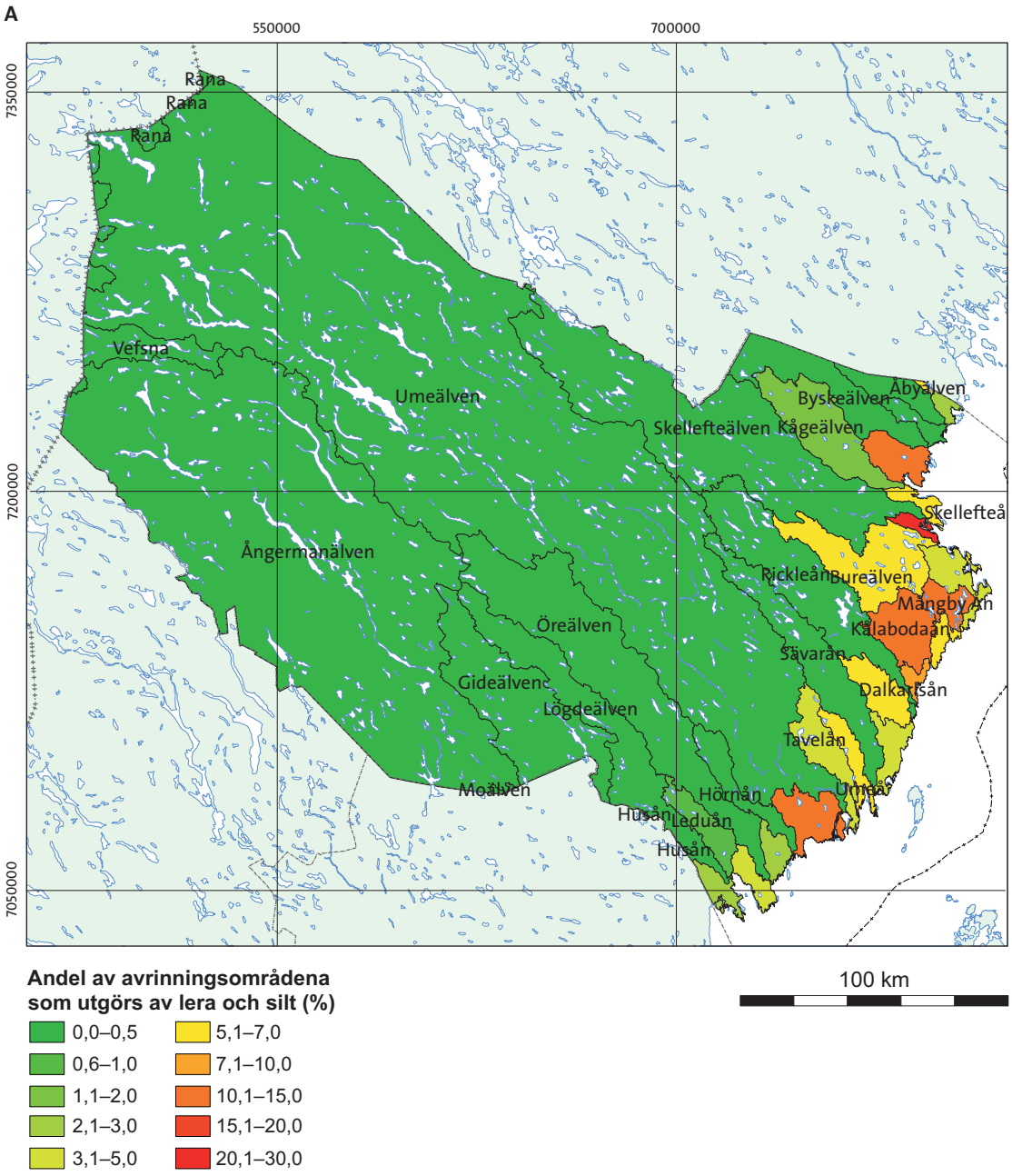
Figur 2. Andelen lera och silt, i områden yngre än 5 000 år, i Norrbottens delavrinningsområden. Fördelningen av lera och silt i delavrinningsområdena ger en lite annan bild än fördelningen i huvudavrinningsområdena. Detta eftersom det finns flera delavrinningsområden med hög andel lera och silt i områdena kring de stora älvarna. **A.** Total andel lera och silt i avrinningsområdet. **B.** Andelen av avrinningsområdena som utgörs av åkermark belägen i områden med lera och silt.

B



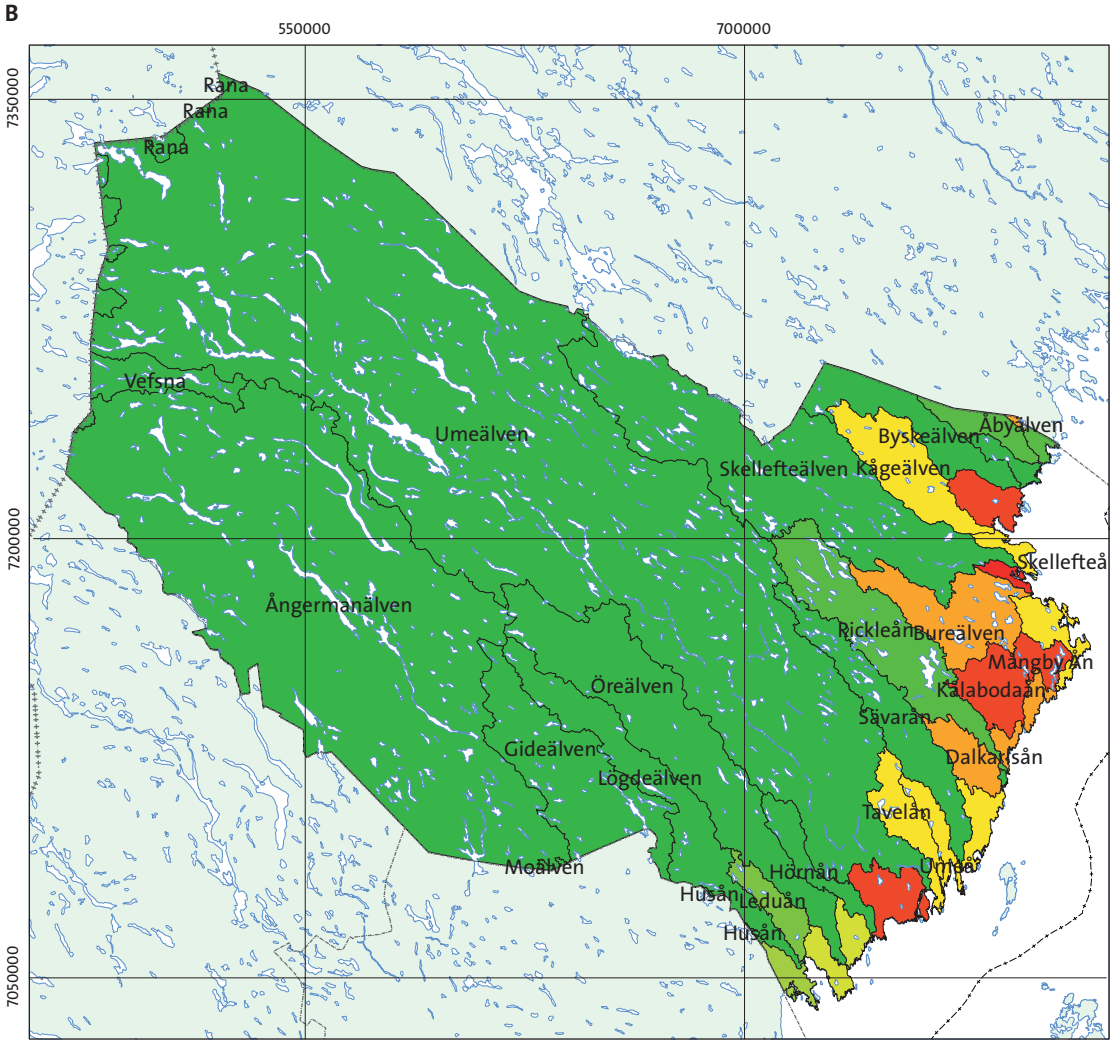
Andel av avrinningsområden som utgörs av jordbruksmark i områden med lera och silt (%)

0,0–0,8	10,4–14,0
0,9–2,5	14,1–18,9
2,6–4,5	19,0–27,8
4,6–7,0	27,9–42,7
7,1–10,3	42,8–70,8



Figur 3. Andelen lera och silt, i områden yngre än 5 000 år, i Västerbottens huvudavrinningsområden. Det är tydligt att det är de mindre, kustnära avrinningsområdena som har den största totala och uppodlade andelen lera och silt. **A.** Total andel lera och silt i avrinningsområdena. **B.** Andelen av avrinningsområdena som utgörs av åkermark belägen i områden med lera och silt.

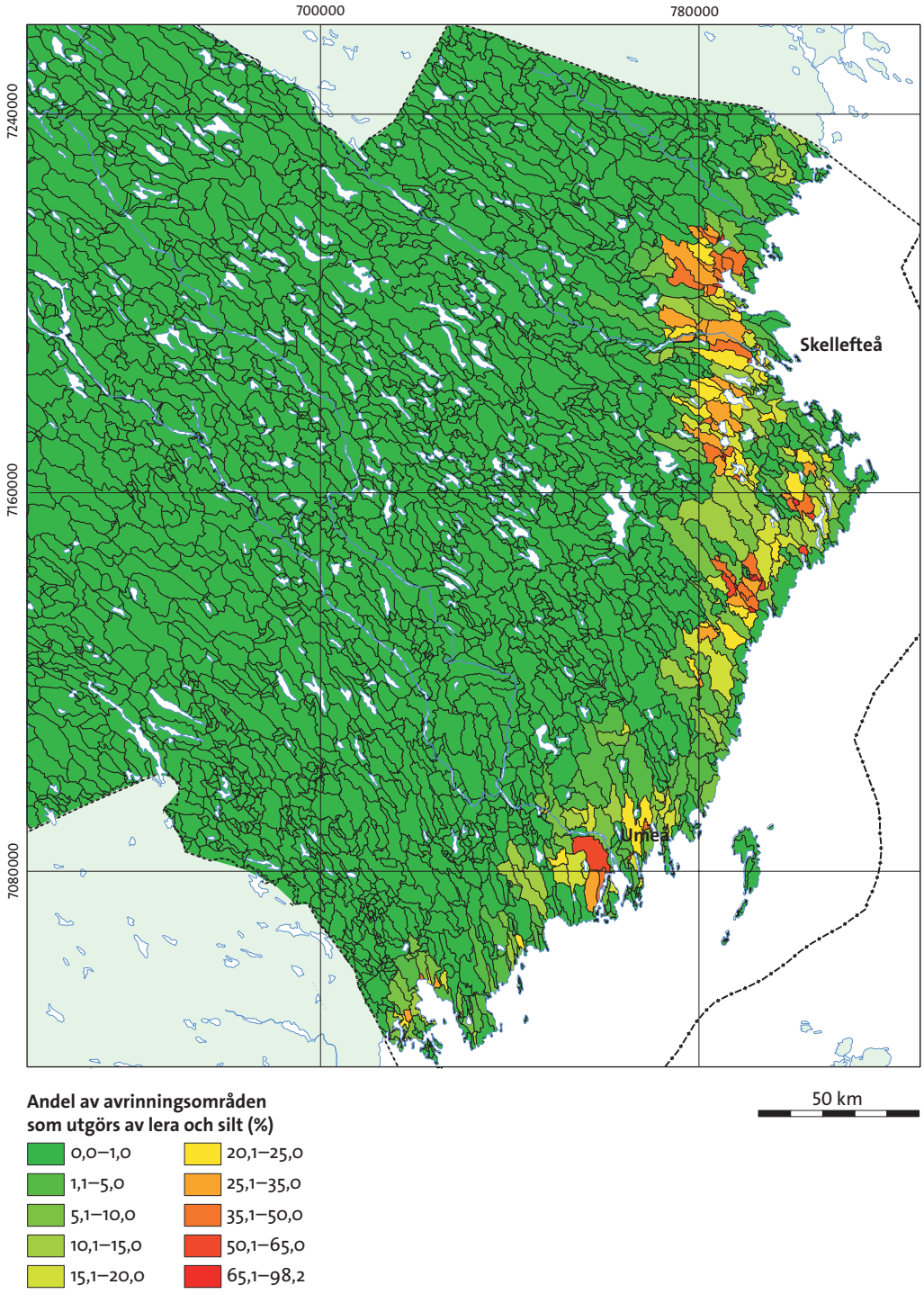
B



Andel av avrinningsområden som utgörs av jordbruksmark i områden med lera och silt (%)

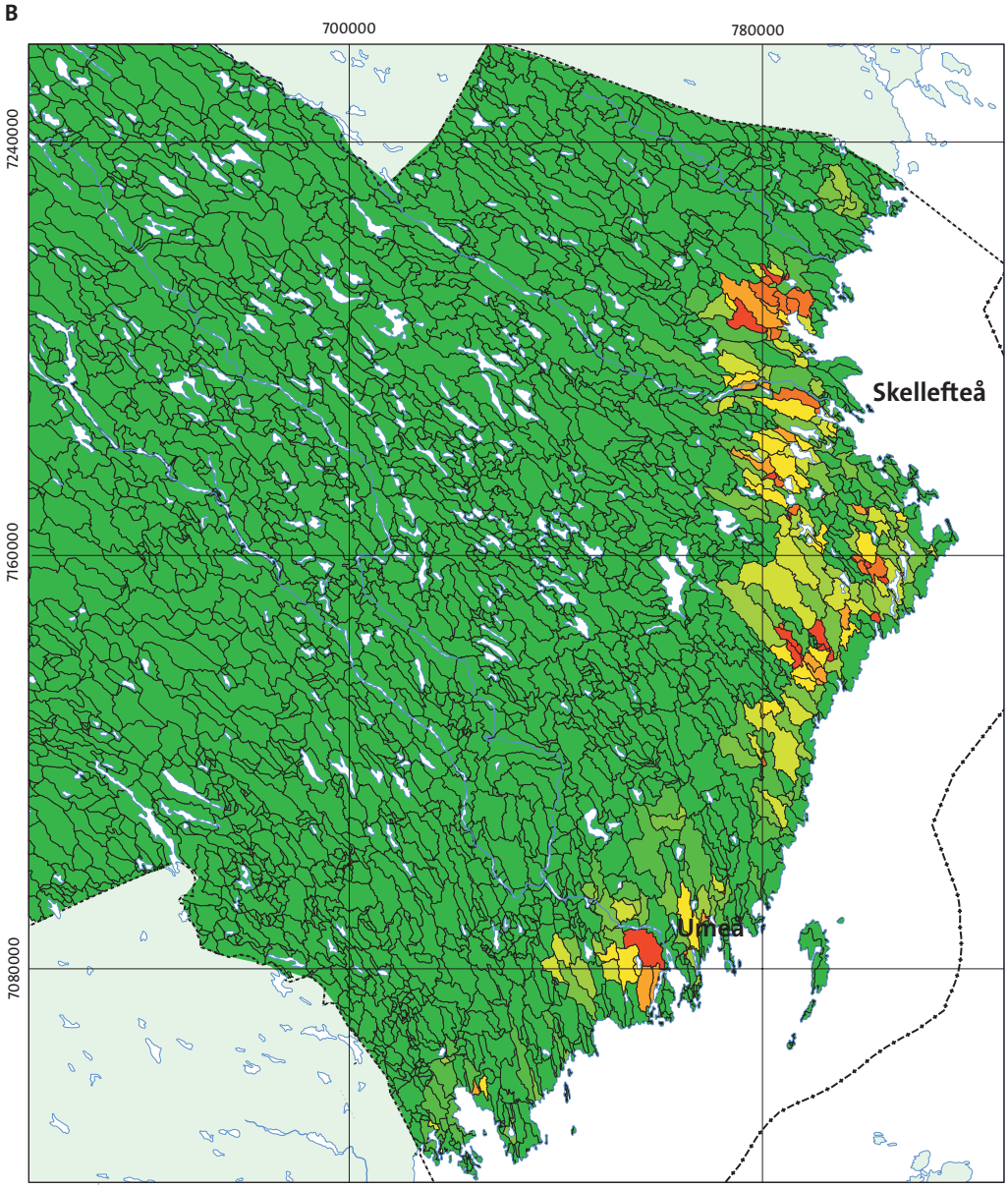
0,0–0,1	1,1–2,0
0,2	2,1–3,0
0,3	3,1–5,0
0,4–0,5	5,1–10,0
0,6–1,0	10,1–18,0

A



Figur 4. Andelen lera och silt, i områden yngre än 5 000 år, i Västerbottens delavrinningsområden. Fördelningen av lera och silt i delavrinningsområdena ger en lite annan bild än fördelningen i huvudavrinningsområdena. Detta eftersom det finns flera delavrinningsområden med hög andel lera och silt i områdena kring de stora älvarna. **A.** Total andel lera och silt i avrinningsområdet **B.** Andelen av avrinningsområdena som utgörs av åkermark belägen i områden med lera och silt.

B



Andel av avrinningsområden som utgörs av jordbruksmark i områden med lera och silt (%)

0,0–0,8	10,4–14,0
0,9–2,5	14,1–18,9
2,6–4,5	19,0–27,8
4,6–7,0	27,9–42,7
7,1–10,3	42,8–70,8